

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra neželezných kovů, rafinace a recyklace



**Životnost tepelných výměníků z Al slitin v prostředí
kondenzátů spalin výfukových plynů**

Disertační práce

Studijní program: Materiálové vědy a inženýrství

Školitel: Prof. Ing. Miroslav Kursá, CSc.

Doktorand: Ing. Zita Drozdová

Ostrava, 2013

Ráda bych touto cestou poděkovala všem, kteří jakýmkoli způsobem přispěli k vytvoření této disertační práce, poděkování patří především panu prof. Ing. Miroslavu Kursovi, CSc. a jeho paní RNDr. Marii Kursové za jejich cenné rady a trpělivost při vedení mé disertační práce. Rovněž bych chtěla poděkovat kolegům a zaměstnancům společnosti Halla Visteon Autopal s.r.o. za vstřícnost a pomoc při získávání potřebných informací a podkladů.

Zita Drozdová

ANOTACE

Disertační práce s názvem *Životnost tepelných výměníků z Al slitin v prostředí kondenzátů spalín výfukových plynů* se zabývá komplexním rozбором zadaného problému. V úvodu je nastíněna problematika přeplňování spalovacích motorů včetně souvislosti s legislativními omezeními, jež vedou k vývoji systémů recirkulace spalín. Ty jsou klíčové pro plnění emisních norem definovaných zákonem za účelem snížení dopadu provozu automobilů na životní prostředí. Jedním z těchto systémů je i vpouštění výfukových plynů do sání přeplňovaného motoru ještě před turbodmychadlem, což vede ke zvýšení efektivity přeplňovaného spalovacího motoru, ale přináší i technické problémy, jako je vznik vysoce korozního prostředí v komponentech, které předtím nebyly agresivními látkami z výfukových plynů vůbec zatíženy. To se týká i chladiče plicního vzduchu, ve kterém se tyto látky vyskytují ve formě agresivních kyselin. Další část disertační práce je proto věnována podrobnému popisu samotného tepelného výměníku – chladiče plicního vzduchu a to i z pohledu jeho výroby, kterou může být korozní odolnost chladiče plicního vzduchu významně ovlivněna. S tím souvisí i samotný výběr vhodných materiálů pro danou aplikaci a jejich charakteristické vlastnosti. Dále se práce zaměřuje, po principiálním popisu koroze, na samotné studium koroze interní. Bylo nutné definovat zcela nové přístupy k ověřování, vyhodnocování a stanovení závěrů z důvodu novosti této problematiky. V experimentální části práce je navržena a popsána úvodní testovací metoda vhodná pro základní výběr materiálů odolných vůči korozi na vnitřní straně chladičů plicního vzduchu, které jsou vystaveny působení kondenzujících spalín produkovaných motory automobilů a zpětně využívaných v systému recirkulace výfukových plynů. Následuje výběr modelových zkušebních médií, návrh testovacích procedur a provedení dalších korozních experimentů materiálů vybraných na základě předchozích výsledků. Práce pokračuje rozбором výsledků a doporučením dalšího postupu řešení problematiky. Následné ověření nejnovějších poznatků v oblasti této problematiky poukazuje na skutečnost aktuálnosti řešení daného problému. V závěru jsou shrnuty provedené testy včetně výsledků, které budou aplikovány při praktickém použití chladičů plicního vzduchu.

ANNOTATION

This dissertation entitled *The Durability of Aluminum Heat Exchangers Exposed to Exhaust Gas Condensates* provides a comprehensive analysis of the issues encountered by aluminum alloys exposed to exhaust gasses containing corrosive constituents. The introduction addresses the challenges encountered in developing modern forced induction (turbocharged and supercharged) internal combustion engines required to meet stringent vehicle emission requirements. These emission standards have led to the need to introduce exhaust gasses into the air intake to improve efficiency of forced induction systems. These exhaust gasses can form acidic substances that contact components, such as charge air coolers, which have not previously seen this type of corrosive environment. A subsequent portion of the dissertation is devoted to a detailed description of automotive charge air cooler heat exchangers and their production which can significantly affect the corrosion resistance of the aluminum materials used in their fabrication. This dissertation contains a principled description of corrosion followed by a focused study of internal corrosion experienced in heat exchangers.

The challenges presented by this this issue require a unique approach when evaluating the corrosion resistance of the aluminum materials used to manufacture heat exchangers. The experimental portion of this work describes a method suitable for the basic selection of materials resistant to the corrosive environment experienced on the inside surface of a charge air cooler due to the presence of condensing exhaust gasses introduced during exhaust gas recirculation. The experimental phase of this work includes: the selection of a model test media (simulated condensate product), the development of a corrosion test procedure, and the generation of aluminum corrosion test results. Conclusion based on the interpretation of the corrosion test results as well as recommendations for future actions are also presented.

ŽIVOTNOST TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ Z AL SLITIN V PROSTŘEDÍ KONDENZÁTŮ SPALIN VÝFUKOVÝCH PLYNŮ	- 1 -
DISERTAČNÍ PRÁCE	- 1 -
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	- 4 -
1.1 PŘEPLŇOVÁNÍ SPALOVACÍCH MOTORŮ	- 4 -
1.2 LEGISLATIVA	- 5 -
1.3 SYSTÉMY RECIRKULACE SPALIN	- 6 -
1.3.1 EGR	- 6 -
1.3.2 Vysokotlaký okruh EGR	- 7 -
1.3.3 Nízkotlaký okruh EGR	- 7 -
1.3.4 Srovnání vysokotlakého a nízkotlakého systému EGR	- 8 -
1.4 CHLADIČ PLNÍČÍHO VZDUCHU	- 8 -
1.4.1 Chlazení vzduch-vzduch	- 9 -
1.4.2 Chlazení vzduch-voda	- 9 -
1.5 VÝROBA CHLADIČŮ PLNÍČÍHO VZDUCHU	- 10 -
1.5.1 Pájení tepelných výměníků v peci s ochrannou atmosférou	- 10 -
1.5.2 Vliv jednotlivých operací pájení na korozi	- 15 -
1.5.3 Konstrukce chladičů plnicího vzduchu	- 16 -
1.6 HLINÍKOVÉ SLITINY STANDARDNĚ POUŽÍVANÉ PRO STAVBU TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ	- 17 -
1.7 KOROZE HLINÍKU	- 18 -
1.7.1 Vliv chemického složení	- 21 -
1.7.2 Bodová koroze	- 22 -
1.7.3 Mezikrystalová koroze	- 24 -
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU KOROZNÍHO TESTOVÁNÍ TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ	- 26 -
2.1 STANDARDNÍ METODY KOROZNÍCH TESTŮ TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ	- 26 -
2.2 SPECIFIKACE VDA	- 29 -
2.3 VYJÁDŘENÍ VÝSLEDKŮ	- 30 -
2.3.1 Metalografické hodnocení korozního napadení	- 31 -
2.4 MEZINÁRODNÍ KONFERENCE „ALUMINIUM BRAZING“	- 32 -
2.5 STATISTICKÉ METODY VYHODNOCENÍ KOROZE	- 32 -
2.5.1 Analýza rozptylu	- 33 -
2.5.2 Nepárový t-test a F-test	- 34 -
2.5.3 Metodika DoE	- 36 -
3 CÍLE A OBSAH DISERTAČNÍ PRÁCE	- 37 -
4 CHEMICKÉ SLOŽENÍ KONDENZÁTŮ SPALIN	- 38 -
5 VÝBĚR MATERIÁLŮ PRO LP EGR APLIKACI	- 40 -
5.1 POVLAKOVANÉ MATERIÁLY	- 40 -

5.2	SLITINY LLA.....	- 40 -
5.3	MULTICLAD MATERIÁLY	- 41 -
6	TESTOVACÍ PROCEDURY.....	- 43 -
6.1	DYNAMICKÝ TEST I.....	- 44 -
6.2	DYNAMICKÝ TEST II	- 47 -
6.3	STATICÝ TEST I	- 49 -
6.4	STATICÝ TEST II	- 52 -
6.4.1	Vyhodnocení působení 1. a 2. kondenzátu ve statickém testu II.....	- 58 -
6.4.2	Vyhodnocení působení 4. kondenzátu ve statickém testu II.	- 63 -
6.4.3	Opakovaný statický test II.....	- 67 -
6.4.3.1	Vyhodnocení působení 1. kondenzátu v opakovaném statickém testu II	- 67 -
6.4.3.2	Vyhodnocení působení 2.kondenzátu v opakovaném statickém testu II	- 79 -
6.4.3.3	Vyhodnocení působení 4.kondenzátu v opakovaném statickém testu II	- 91 -
6.4.4	Statistické vyhodnocení testů (výsledků).....	- 104 -
6.5	STATICÝ TEST III.....	- 106 -
7	SOUHRN VÝSLEDKŮ TESTOVACÍCH PROCEDUR.....	- 111 -
8	ZÁVĚR	- 114 -
8.1	PŘÍNOS PRÁCE.....	- 116 -
9	POUŽITÉ ZDROJE	- 117 -
10	SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ	- 121 -
11	SEZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ VELIČIN.....	- 122 -

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Automobilový průmysl je dynamicky se rozvíjející průmyslové odvětví s vysokou konkurencí. Konkurenční boj žene automobilky stále kupředu. Modely jednotlivých automobilek se stále porovnávají a každý koncern se snaží být o krok napřed. Pro tyto účely jsou investovány nemalé prostředky do vědy, vývoje a výzkumu nových technologií, konstrukčních prvků a materiálů.

Jedním z klíčových materiálů používaných právě v automobilovém průmyslu je hliník a jeho slitiny. Evropský automobilový průmysl víc než zdvojnásobil průměrné množství hliníku používaného pro konstrukci aut. Rozhodující je výběr vhodné hliníkové slitiny pro danou aplikaci. V roce 2000 bylo průměrně použito pro stavbu jednoho automobilu cca 100 kg hliníku respektive jeho slitin, přičemž z 60% to byly díly motoru, z 10% konstrukční díly a 30% pak ostatní. Jednou z hlavních výhod hliníku je jeho dostupnost v širokém spektru polotovarů. Hliníkové slitiny nabízí velkou škálu vlastností, proto mohou být vyráběny přesně podle požadavků specifických automobilových aplikací a to díky velkému výběru slitin, jejich stavu a zpracování. Klíčovými vlastnostmi hliníku pro použití v automobilovém průmyslu jsou nízká hustota, vysoká pevnost v poměru k hustotě, pružnost, odolnost vůči korozi, schopnost tváření, spojování (pájení, svařování), dobré deformační vlastnosti, odolnost vůči chladu, recyklovatelnost, tepelná vodivost a odrazivost [1].

Dalším významným prvkem určujícím směr rozvoje a tudíž i oblasti výzkumu jsou kromě materiálů i nejrůznější legislativní nařízení a normy, které je nutné dodržovat a které, mimo jiné, neustále zpřísňují limity pro exhalace automobilů z důvodů snížení dopadu na životní prostředí.

Jednou z možností, jak snížit emise ze spalovacích motorů, zejména vznětových, je použití chladiče plnicího vzduchu pro dochlazování spalin recirkulovaných z výfukového potrubí zpět do sání motoru. Tímto způsobem dojde k maximálnímu využití recirkulovaných spalin, čehož důsledkem je právě snížení samotných emisí ve výfukových plynech automobilu [2]. Toto řešení však v sobě ukrývá řadu vědecko-technických problémů, které je třeba vyřešit. Jedním ze zásadních je problematika extrémního korozního prostředí, které vznikne při průchodu spalin v chladiči plnicího vzduchu. Zde je nutné definovat vznikající chemické látky, dále definovat testovací procedury a provést je. Na základě výsledků testování určit materiály, které tomuto koroznímu prostředí odolají a bude je možné použít v praxi. Pro praktické použití je také nezbytné definovat testovací procedury pro sériové testování, což znamená, že na základě výsledků provedených korozních zkoušek budou predikovány podmínky pro ověřování materiálů navržených pro stavbu chladičů plnicího vzduchu v korozně agresivním prostředí nízkotlakého systému recirkulace spalin.

1.1 PŘEPLŇOVÁNÍ SPALOVACÍCH MOTORŮ

Na přelomu 19. a 20. století zkoumali Gottlieb Daimler a Rudolf Diesel možnost zvýšení výkonu a snížení spotřeby paliva spalovacích motorů počátečním stlačováním vzduchu. V roce 1905 získal Švýcar Alfred Büch patent za sestrojení spalovacího motoru s vratným režimem, otočného kompresoru a turbíny poháněné energií výfukových plynů. Pokusná výroba turbodmychadel pak byla zahájena v roce 1911 firmou Sulzer Bros Ltd, Winterthur ve Švýcarsku.

V roce 1925 se poprvé úspěšně použily naftové motory o výkonu 2000 HP v německých lodích, na jejich základě pak zažádali výrobci o licenci na celém světě. Třicátá léta minulého století proběhla ve znamení vývoje přeplňování ve velkých motorech: pro lodě, lokomotivy a průmyslové motory. Válečné období přineslo prudký rozvoj technologie plynových turbín leteckých motorů, výsledkem čehož byl vznik nových materiálů a konstrukcí umožňujících vývoj turbodmychadel v dieselových motorech i pro malé automobily.

Výrobci motorů Cummins, Scania a Volvo zahajují výrobu nákladních automobilů vybavených turbodmychadly. Němec Kurt Beirer vyvinul první kompaktní model turbodmychadla. V roce 1954 firma Cummins nabízí řadu motorů s turbodmychadly, v témže roce nabídla i společnost Volvo svůj první motor s turbodmychadlem. Za zmínku stojí také obsazení první startovní pozice v roce 1952 v Indianapolis automobilem, který Cummins vybavil motorem přeplňovaným turbodmychadlem. Prvními osobními automobily s turbodmychadly ve Spojených státech amerických byly Chevrolet Corvair Monza a Oldsmobil Jetfire v letech 1962-1963. Nebyly však příliš spolehlivé, proto se neujaly.

Ropná krize v sedmdesátých letech a stále přísnější normy emisí výfukových plynů způsobily značný vzrůst popularity přeplňovaných motorů v nákladních automobilech, avšak jejich tehdy nízká účinnost a malá úspornost způsobily, že se neprosadily v osobních automobilech.

V 70. letech se motory s turbodmychadly prosadily v závodech Formule 1. Tyto motory však nebyly příliš ekonomické a navíc časový odstup aktivace turbodmychadly byl pro mnoho řidičů velký a neúnosný.

Opravdový přelom nastal v osmdesátých letech, kdy se na trhu objevily automobily Mercedes řady 300 v roce 1978 a o tři roky později Volkswagen Golf, vybavené dieselovými motory s turbodmychadlem. Byl to okamžik, kdy toto řešení sklídilo úspěch také u osobních automobilů, a tak je tomu dodnes. Velmi vysoký výkon, nízká hmotnost rotujících součástí a s ní související nízká setrvačnost systému, revoluční řešení s proměnlivou geometrií turbínových lopatek způsobily, že turbodmychadla nyní najdeme ve všech nákladních automobilech a že se revolučně změnil názor na dieselové motory. Dnes se už turbodmychadlové typy benzínových motorů nehodnotí z pohledu výkonu, ale spíše s ohledem na možný způsob snížení spotřeby paliva a tím i znečištění životního prostředí díky nižším emisím oxidu uhličitého. V současnosti se turbodmychadla používají hlavně proto, že umožňují využívat energii výfukových plynů a tím snížit spotřebu paliva i emisí [3][4].

Při přeplňování turbodmychadlem jde o vzájemné pneumatické působení mezi kompresorem a motorem. Kompresor dodává do motoru vzduch o vyšší hustotě, v motoru dochází ke spalování paliva a následné expanzi výfukových plynů na turbíně, která je na společném hřídeli s kompresorem, který pohání. V okruhu přeplňovaného motoru se v současné době standardně nachází kompresor, chladič plnicího vzduchu, samotné válce motoru, turbína, EGR ventil a případně i filtr pevných částic [5].

1.2 LEGISLATIVA

Aby mohl být automobil homologován, musí plnit řadu norem, mezi jinými i důležitou emisní normu. Emisní norma stanovuje množství spalin, které automobil může vypouštět do ovzduší. V České republice upravuje tyto hodnoty zákon č. 56/2001 Sb. ve znění pozdějších předpisů. Tyto předpisy vycházejí z norem Evropské hospodářské komise (EHK) a Evropského společenství

(ES). Jako souhrnné označení norem emisních předpisů se používá označení EURO + číslo normy, například v současné době platné EURO 5. Díky těmto normám se v Evropě daří snižovat emise např. CO₂. Od roku 1995 do roku 2003 klesly emise CO₂ ze 186 na 164 g/km. Evropská hospodářská komise by chtěla dosáhnout všeobecného průměru 95 g/km do roku 2020. Vývoj a výroba takových motorů je však podle automobilek velmi nákladná. Jednou z cest, jak podpořit vývoj ekologických motorů, jsou daňové a jiné úlevy pro ekologicky smýšlející motoristy.

Většina výrobců je toho názoru, že zavedení nových emisních norem Euro povede k růstu cen nových automobilů. Na druhou stranu zavedení nové normy Euro 5 snížilo množství sazí u vznětových motorů proti Euro 4 pětinasobně. Zajímavostí je, že aktuálně platná norma Euro 5 povoluje o 97% méně sazí než patnáct let stará norma Euro 1.

Pro dosažení takto přísných emisních limitů je nutné užití dodatečných systémů a technických prvků v automobilu. Jedním z nich je systém recirkulace výfukových plynů nazývaný jako EGR (Exhaust Gas Recirculation). Vývoj nízkotlakého systému EGR, viz kapitola 1.3.3, je vyvolán z důvodu požadavků Evropské unie na snížení emisí výfukových plynů, což se právě pomocí tohoto systému daří [6]. Emisní norma označovaná jako Euro 5, platná od roku 2008, stanovuje limitní hodnoty výfukových plynů: oxidu uhelnatého (CO), uhlovodíků (HC), oxidů dusíku (NO_x) a množství pevných částic (PM) [7]. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny níže, viz *Tab. 1.2.1*.

Tab. 1.2.1 Limitní hodnoty výfukových plynů dle Euro 5 respektive Euro 6 (hodnoty v závorkách) [7].

		Základní množství (RM)	Mezní hodnoty											
			Oxid uhelnatý (CO)		Uhlovodíky celkem (THC)		Uhlovodíky bez metanu (NMHC)		Oxidy dusíku (NO _x)		Uhlovodíky celkem a oxidy dusíku (THC+NO _x)		Pevné částice (PM)	
		(kg)	L ₁ (mg/km)		L ₂ (mg/km)		L ₃ (mg/km)		L ₄ (mg/km)		L ₃ +L ₄ (mg/km)		L ₅ (mg/km)	
Skup.	Třída		PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI
M	-	All	1000	500	100	-	68	-	60	180 (80)	-	230 (170)	5	5
N1	I	RM≤1305	1000	500	100	-	68	-	60	180 (80)	-	230 (170)	5	5
	II	1305<RM≤1760	1810	630	130	-	90	-	75	235 (105)	-	295 (195)	5	5
	III	1760≤RM	2270	740	160	-	108	-	82	280 (125)	-	350 (215)	5	5
N2	-		2270	740	160	-	108	-	82	280 (125)	-	350 (215)	5	5

Vysvětlivky: PI=zážeh, CI=samovznícení. Uvedené hodnoty se vztahují pouze pro vozidla se zážehovými motory s přímým vstřikováním.

1.3 SYSTÉMY RECIRKULACE SPALIN

1.3.1 EGR

EGR-exhaust gas recirculation, česky recirkulace výfukových plynů, se používá k redukci oxidů dusíku (NO_x) v zážehových i vznětových motorech. Jedná se o zpětné vedení části spalin do sání a dále do spalovacího prostoru. Množství spalin přiváděných zpět do sání reguluje ventil

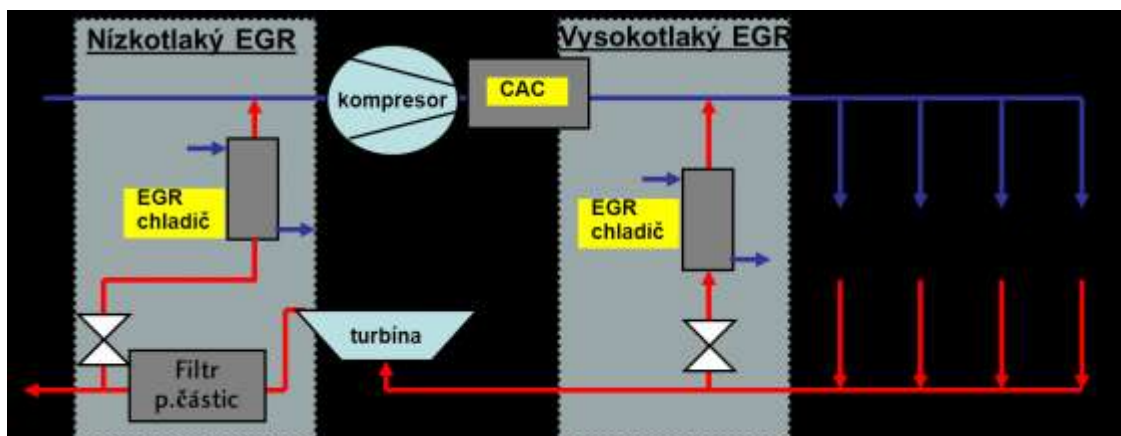
recirkulace spalin (EGR ventil), který je umístěn ve spojovacím potrubí. Výfukové plyny se chovají jako inertní plyny, nepodílejí se proto na spalování zápalné směsi. Hlavní příčinou tvorby oxidů dusíku je snížení maximální teploty ve válcích, k čemuž dochází jednak snížením podílu kyslíku v nasávaném vzduchu a jednak tím, že výfukové plyny snadno pohlcují teplo [8].

U zážehových motorů se systémem recirkulace spalin činí podíl výfukových plynů přemístěných do zápalné směsi maximálně asi 20% (při částečném zatížení), což má za následek snížení NO_x o asi 20%. Podíl výfukových plynů přiváděných do sání nelze příliš zvyšovat, neboť by to u zážehových motorů vedlo k výpadkům zapalování a nárůstu uhlovodíků (HC) a oxidu uhelnatého (CO). I tak je nutno zajistit dokonalé promísení výfukových plynů s nasávanou směsí paliva a vzduchu. Kromě toho mají výfukové plyny vyšší měrnou tepelnou kapacitu než vzduch a podíl vody ve vrácených výfukových plynech snižuje dodatečně teploty spalování [9].

Systém EGR tedy snižuje emise. Jeho vývoj a zdokonalování má pozitivní vliv na životní prostředí tím, že pomáhá plnit stále přísnější ekologické požadavky na provoz vozidel poháněných spalovacími motory.

1.3.2 VYSOKOTLAKÝ OKRUH EGR

Ve stávajících systémech recirkulace spalin (EGR) je z chladiče stlačeného vzduchu ochlazený vzduch vháněn do motoru a před vstupem do motoru se mísí se vzduchem a spalínami z EGR systému, viz Obr. 1.3.1. Nevýhoda tohoto systému spočívá v tom, že je přidáván vzduch o vysoké teplotě cca 200°C do cca o 2/3 chladnějšího plnicího vzduchu, vycházejícího z chladiče plnicího vzduchu. Zvyšuje tak jeho teplotu a snižuje účinnost spalovacího procesu. V motoru dojde ke spálení směsi, část odchází do turbíny a dále do výfuku a část zpět do EGR. Tento systém je označován jako vysokotlaký [10].



Obr. 1.3.1 Schéma nízkotlakého a vysokotlakého okruhu EGR [10].

1.3.3 NÍZKOTLAKÝ OKRUH EGR

V nízkotlakém systému je EGR umístěn před kompresorem a za filtrem pevných částic, viz Obr. 1.3.1. Horký vzduch z EGR je dochlazován v chladiči plnicího vzduchu, kde tak dochází k jeho dodatečnému ochlazení a snížení teploty plnicího vzduchu v sání motoru, což zvyšuje efektivnost spalovacího procesu.

Vzhledem k nutnosti použití filtru pevných částic se tímto prodlužuje i životnost EGR, kdy spaliny jsou ve filtru zbaveny pevných částic a nedochází tak k usazování a snižování jeho účinnosti či úplného zanesení sazí [10].

Tento systém je v současné době předmětem vývoje a výzkumu jeho vlastností. Dříve se vzhledem k technické náročnosti nepoužíval. Až s nastupujícími přísnými požadavky evropské směrnice, viz *Tab. 1.2.1*, je nutné vyvinout takové systémy a používat takové komponenty, které jsou schopny splnit zadané maximální limity výfukových plynů. Prvotní zkušenosti ukazují, že se to díky tomuto systému EGR může podařit.

Je však nutné provést podrobný výzkum v této oblasti, protože současným největším problémem je nedostatek vstupních informací, které by umožňovaly návrh jak samotného systému, tak komponentů v tomto systému použitých. Problémem je zejména komplexnost řešené problematiky, která zahrnuje mimo jiné extrémní prostředí vytvořené výfukovými plyny působícími na materiály použité v celém okruhu a tudíž problém korozního napadení použitých materiálů z vnitřní strany tepelných výměníků. Ta není ani tak zásadní u samotného chladiče EGR, který je vyroben z nerezové oceli, jako u dalších komponentů. Jedná se zejména o tepelný výměník v tomto okruhu, kterým je chladič plnicího vzduchu, pro jehož výrobu jsou použity slitiny hliníku. V tomto tepelném výměníku dochází k nebezpečné kondenzaci kyselin. Z tohoto důvodu je nutné zabývat se vývojem v této oblasti hlouběji. Je nutné podrobně definovat korozní prostředí v nízkotlakém systému a na tomto základě pak volit materiály s vyhovující korozní odolností v tomto náročném prostředí, což je cílem a praktickým přínosem této práce.

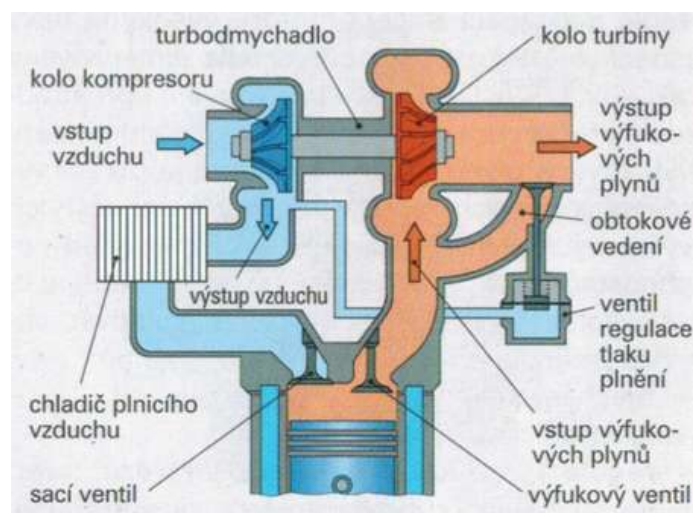
1.3.4 SROVNÁNÍ VYSOKOTLAKÉHO A NÍZKOTLAKÉHO SYSTÉMU EGR

Hlavní výhodou nízkotlakého okruhu EGR vůči vysokotlakému je, že lze docílit nižší spotřeby paliva díky lepšímu využití spalin, kdy lze využít většího podílu spalin pro vstup do EGR okruhu. Tím je docíleno lepší dynamiky motoru v nízkých otáčkách díky vyššímu průtoku spalin přes turbodmychadlo (v okruhu je nezbytné použít filtr pevných částic).

Základní problematika nízkotlakého systému spočívá v množství kondenzujících agresivních kyselin v chladiči plnicího vzduchu (zanášení sazí řeší filtr pevných částic). Tento problém je v současné době řešen použitím jak nízkotlakého tak vysokotlakého EGR okruhu s možností úpravy průtoku spalin oběma okruhy. Úkolem je však docílit maximálního průtoku nízkotlakým okruhem, což je v současné době předmětem výzkumu, neboť u stávajícího vysokotlakého systému jsou spaliny přiváděny až za chladič plnicího vzduchu, tudíž zde k zanášení sazí vůbec nedochází.

1.4 CHLADIČ PLNÍČÍHO VZDUCHU

Chladič plnicího vzduchu (CAC – charge air cooler) je tepelný výměník používaný u tzv. přeplňovaných spalovacích motorů. Je umístěn mezi kompresorem či turbodmychadlem a spalovacím motorem, viz *Obr. 1.4.1* [11].



Obr. 1.4.1 Schéma chlazení motoru [11].

Velikost chladiče plnicího vzduchu závisí na obsahu motoru, chladiče plnicího vzduchu menších rozměrů se nejčastěji používají v motorech osobních a nákladních automobilů. Ty největší pak v dieselových motorech dopravních lodí (dosahují hmotnosti až přes dvě tuny).

Účelem použití je snížení teploty plnicího vzduchu zahřátého stlačovacím procesem. Ochlazením stlačeného vzduchu před vstupem do válců motoru je dosaženo vyšší účinnosti celého procesu přeplňování. Při nižší teplotě má vzduch vyšší hustotu, do válců motoru je nasáto větší objemové množství, čímž dochází k účinnějšímu spalování, což v konečném důsledku zvyšuje výkon spalovacího motoru. Při ochlazování v chladiči plnicího vzduchu prochází plnicí vzduch hliníkovými trubkami, do kterých jsou pro zvýšení účinnosti přestupu tepla umísťovány vlnovce vyrobené z hliníkových fólií. Chladicí tekutina proudí zpravidla kolmo na tyto trubky, výjimku tvoří takzvané vodní mezichladiče, které jsou popsány v kap. 1.4.2. Pro vyšší účinnost jsou trubky s plnicím vzduchem vzájemně spojeny opět vlnovci, které umožňují efektivnější výměnu tepla s okolím a tvoří tak kompaktní tepelný výměník [12].

1.4.1 CHLAZENÍ VZDUCH-VZDUCH

Plnicí vzduch je veden do chladiče plnicího vzduchu umístěného zpravidla před chladičem motoru. Před sestavou chladičů je dále umístěn axiální ventilátor. Tento způsob je konstrukčně jednodušší než chladič vzduch – voda, ale je náročnější na umístění, zástavbové rozměry a jsou zde větší tlakové ztráty v chladiči plnicího vzduchu a v délce vedení plnicího vzduchu.

1.4.2 CHLAZENÍ VZDUCH-VODA

Chladičem plnicího vzduchu prochází chladicí voda z chladicího okruhu motoru. Tyto chladiče jsou menší, kompaktnější, s menší tlakovou ztrátou ve vedení a snadnějším umístěním v motorovém prostoru, avšak vyžadují svůj vlastní chladicí okruh napojený na chladicí okruh motoru. Hlavní výhodou pro tento typ chlazení chladiče plnicího vzduchu je skutečnost, že jej lze v motorovém prostoru naklonit (za nezměněné účinnosti), čímž lze například zabránit shromažďování kyselin a tím zvyšování jejich koncentrace uvnitř výměníku a lépe ho tak chránit vůči korozi vnitřního povrchu [13].

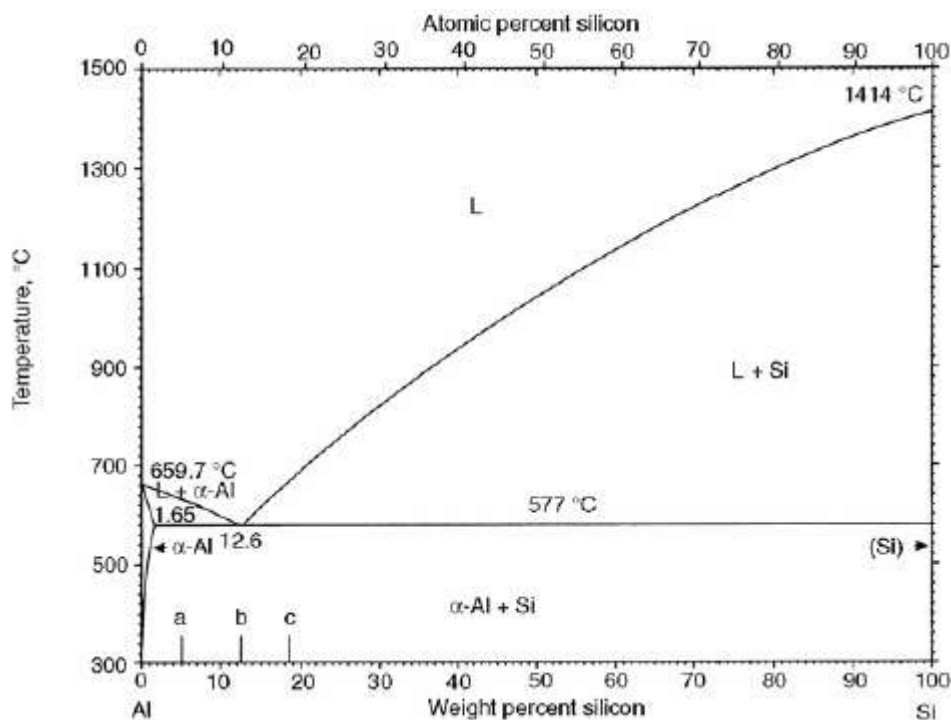
1.5 VÝROBA CHLADIČŮ PLNÍCIHO VZDUCHU

1.5.1 PÁJENÍ TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ V PECI S OCHRANNOU ATMOSFÉROU

Pájení v peci je druhem kapilárního pájení, kdy dochází k ohřevu celého objemu součásti. Výhoda této metody spočívá v možnosti pájení více součástí složitých tvarů najednou, navíc nedochází ke vzniku vnitřních pnutí a deformací díky rovnoměrnému ohřevu i ochlazení součástí. Při pájení v peci lze přesně nastavit pracovní teploty i dobu pájení, čímž se dá dosáhnout opakovatelnosti výsledků. Pájení probíhá v ochranné atmosféře dusíku, která chrání povrch pájené součásti před oxidací [14].

Pájení je při výrobě tepelných výměníků věnována značná pozornost, protože pájené spoje hliníkových komponentů jsou velice náchylné ke koroznímu napadení, a to z důvodu negativního elektrodového potenciálu hliníku, jehož vlivem dochází ke galvanické korozi při pájení s ušlechtlejšími materiály. Proto byl kladen velký důraz na ochranu proti korozi, což vedlo k přijetí vybraných hliníkových slitin jako základních materiálů vhodných pro pájení. Stupeň galvanické koroze je funkcí rozdílu elektrodových potenciálů kovů v elektrolytu. Negativnější z obou materiálů pak koroduje. Pájecí materiály mohou obsahovat různé fáze, jejichž elektrodový potenciál nelze jednoduše odhadnout na základě chemického složení dané slitiny. Nejčastěji používaným pájecím materiálem určeným pro pájení hliníku je slitina o eutektickém složení Al-Si12 [15].

Tepelné výměníky pro automobily se vyrábějí velkosériově ze sendvičových materiálů. Jako sendvičové materiály jsou označovány hliníkové pájecí plechy, které jsou složeny ze základního a plátovacího materiálu, kdy je plátovací materiál naválcován za tepla na základní materiál a to buď jedno- nebo oboustranně. Základní materiál je navržen tak, aby po pájení poskytl finálnímu výrobku požadované vlastnosti. Při pájení dochází ke spojení komponentů roztaveným plátovacím materiálem neboli pájkou, jejíž teplota tavení je nižší než teplota tavení základního materiálu. Plátovacím materiálem jsou slitiny hliníku s obsahem 6-14 hm.% Si označované EN AW-4xxx, jejichž teplota tavení se pohybuje mezi 570 až 610°C, viz *Obr. 1.5.1*. Typickým základním materiálem je slitina EN AW-3xxx s teplotou tání kolem 650°C. Základní materiál poskytuje strukturní integritu, zatímco se nízkotavitelná pájka rozpouští za účelem vytvoření pájeného spoje, viz *Obr. 1.5.2* [16]. Tloušťka plátování se pohybuje mezi 4-20% tloušťky stěny základního materiálu u jednostranně plátovaných materiálů a mezi 4-15% tloušťky stěny základního materiálu u oboustranně plátovaných materiálů v závislosti na kombinaci a tloušťce spojovaných materiálů.

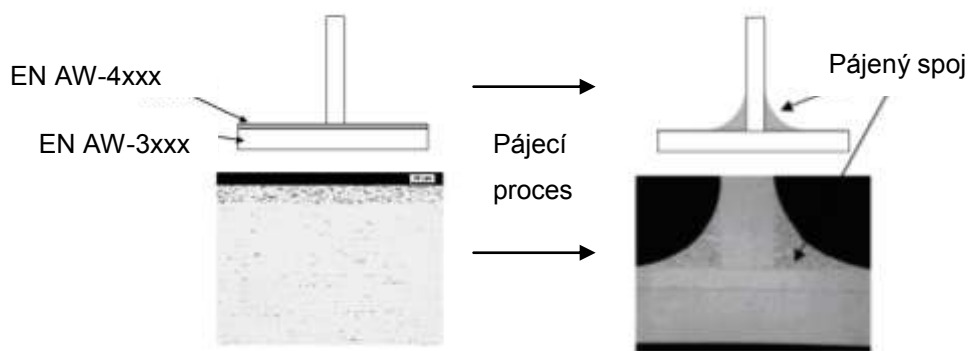


Obr. 1.5.1 Fázový diagram hliníku a křemíku [15].

Pájka se nanáší na základní materiál trubky nebo mezi komponenty, které mají být spojeny (trubka-vlnovec). Složené materiály jsou zahřáty na teplotu kolem 600 °C, kdy se pájka kompletně rozpouští, základní materiál nikoli. Při pájecí teplotě difunduje Si do základního materiálu a tvoří pájený spoj. Po ochlazení vytváří pájka metalurgický spoj mezi spojovanými povrchy součásti. Pájecí proces v ochranné atmosféře dusíku nastává v peci za následujících podmínek:

- Operační teplota se pohybuje okolo 600 °C po dobu max. 5 minut
- Homogenita teploty součásti je $\pm 3^\circ\text{C}$
- Pájení probíhá v atmosféře dusíku (rosný bod -40°C) bez kyslíku (méně než 100 ppm obsahu O_2)
- Pájení probíhá za použití tavidla

Obchodní název pro neagresivní tavidlo používané během tohoto procesu je NOCOLOK®, jehož patentované složení odpovídá chemickému vzorci $\text{K}_{1-3}\text{AlF}_{4-6}$ [16]. Tavidlo má v procesu pájení hned několik funkcí: odstranění oxidického filmu z povrchu pájeného materiálu a následná ochrana povrchu obnaženého materiálu před opětovnou oxidací. Dalším nezanedbatelným úkolem tavidla je snížení povrchového napětí pájeného kovu, podpora smáčivosti základního materiálu a zajištění zabíhavosti pájky. Po rozpuštění tavidla při teplotě okolo 562 °C dojde ke smáčení povrchu komponentů, čímž je umožněno pájce vztlínáním volně zatéct do spojů. Během doby chlazení zůstává tavidlo na povrchu jako tenký film [17].



Obr. 1.5.2 Schéma tvorby pájeného spoje u hliníkových slitin [18].

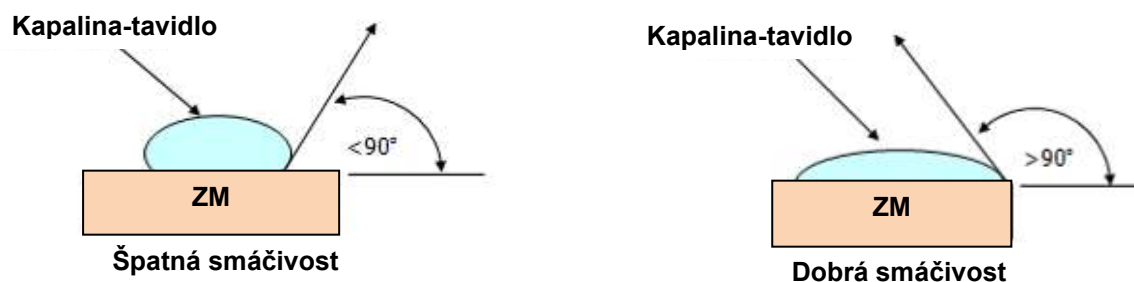
Pájecí proces sestává z následujících kroků: **Odmaštění** → **Nanesení tavidla (Nocolok)** → **Sušení** → **Vstup do pece** → **Přehřev** → **Pájení** → **Chlazení** → **Výstup z pece** → **Ochlazení na vzduchu**

Tepelné odmaštění probíhá v peci, kde dochází k odpaření mazacího oleje, který je přítomen v důsledku výroby vlnovců a stavby vložky. Složená vložka a pájecí přípravky jsou umístěny na dopravník do odmašťovače. Tím začíná pájecí proces. Odmašťovač pracuje při teplotách až 300°C v závislosti na množství a velikosti vložek a na typu mazacího oleje [18].

Po odmaštění je nutné tepelný výměník ochladit nuceným větráním na okolní teplotu, aby mohlo dojít k nástřiku tavidla, které se dodává ve formě prášku, na výměník je však aplikováno v tekuté směsi tavidla a deionizované vody. Použití deionizované vody je nezbytné, aby nedocházelo ke kontaminaci povrchu materiálu úsadami solí, které by mohly zapříčinit následnou korozi. Směs se nanáší seřiditelnými tryskami, které zajišťují precizní nanesení tavidla na celý výměník. Přebytké tavidlo je pak odstraněno proudem vzduchu [19].

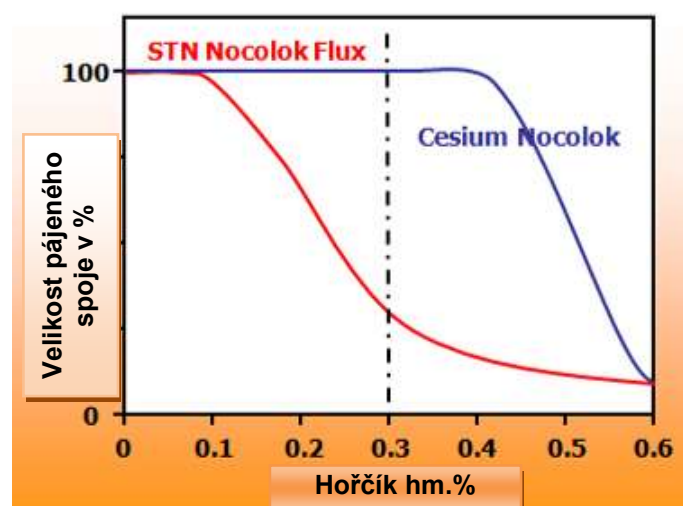
Povrch materiálu může ovlivnit množství tavidla, které na něm ulpí. Smáčivost je schopnost kapaliny - tavidla přilnout k povrchu materiálu a roztékavost je schopnost kapaliny – tavidla se roztéct po povrchu základního materiálu. Při smáčení nabývá kapka roztaveného pájecího materiálu takového tvaru, aby povrchová energie celého systému (základní materiál-pájka-tavidlo) byla minimální a mohly by tedy působit meziatomové síly. Na kapku kapaliny působí adhezní síly, což jsou přitažlivé síly atomů povrchové vrstvy tuhého materiálu a tekuté pájky, dále kohezní síly (přitažlivé síly sousedních atomů v tekuté pájce) a přitažlivé síly atomů plynného prostředí. Podle působení jednotlivých sil lze rozlišit dokonalou smáčivost a nesmáčivost. V prvním případě jsou kohezní síly menší než adhezní, v případě nesmáčivosti naopak. Při smáčení působí meziatomární síly vzniklé na mezifázovém rozhraní. Tyto síly se šíří po celé ploše styku, čímž se snižuje volná povrchová energie systému. Dochází tedy ke změně dvou volných povrchů v jedno mezifázové rozhraní mezi pevným a tekutým kovem, kde ionty roztavené pájky přecházejí do krystalické mřížky základního materiálu. Při vzájemném působení atomů základního materiálu a pájky dochází k vytváření kovové vazby, což je termodynamicky výhodné, neboť dochází ke zmenšení energie systému díky zmenšení volného povrchu [20]. Kritériem pro smáčení je stykový úhel, který svírá tečna povrchu pájky se základním materiálem. Dokonalá smáčivost platí pro úhel roven nule, velmi dobrá smáčivost se považuje pro úhel menší 20°. Naopak špatná smáčivost je v případě velikosti úhlu většího než 90°, viz Obr. 1.5.3.

Tím dojde k vytvoření adheze mezi kapalinou a pevnou látkou. Na následujícím Obr. 1.5.3 je zřejmé, jak povrchová energie pevné látky ovlivní smáčení kapaliny.



Obr. 1.5.3 Princip smáčivosti kapaliny [21].

Smáčivost během pájení ovlivňuje i přítomnost hořčíku, který se ke slitinám přidává pro zvýšení mechanických vlastností. Hořčík totiž velice ochotně reaguje s kyslíkem, brání tak funkci tavidla rozrušit oxidický film. Na povrchu hliníkového materiálu pak zůstávají oxidy hořčíku, pájka proto nemůže dobře zatéci, na povrchu vznikají mapy a následně po pájení póry ve spojích. Při vyšším obsahu hořčíku dokonce vůbec nedojde ke vzniku pájeného spoje. Jako maximální přípustný obsah hořčíku ve slitinách určených k pájení v ochranné atmosféře dusíku se udává 0,3 hm.%. Tato hodnota je myšlena jako konečná, jde tedy o součet obsahu hořčíku, jak v trubce, tak pájce. Platí to pro pájení v peci v ochranné atmosféře dusíku, pro pájení ve vakuu může obsah hořčíku dosahovat i několika procent. Vliv obsahu hořčíku na kvalitu spoje udává graf, viz Obr. 1.5.4.



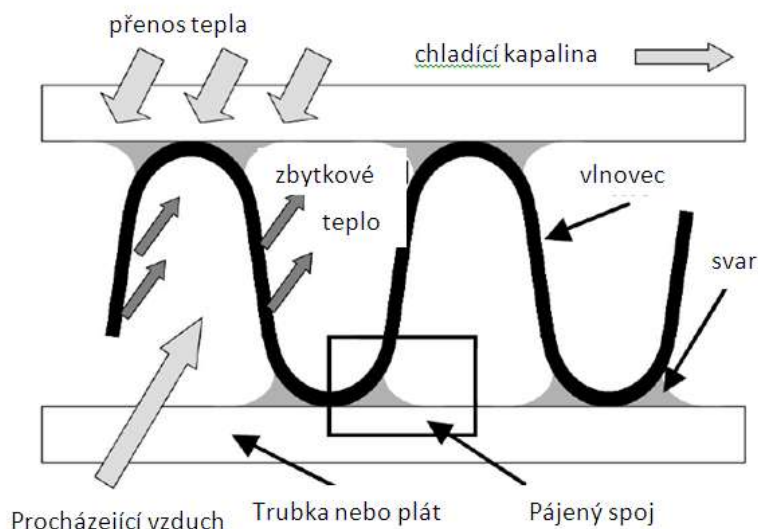
Obr. 1.5.4 Vliv obsahu hořčíku na účinnost pájecího procesu [16].

Jednotlivé kroky pájecího procesu včetně teplotního profilu jsou znázorněny níže, viz Obr. 1.5.6. Poslední předběžnou úpravou jednotlivých dílů před vstupem do pájecí pece je sušení, které má zajistit odstranění vody z tavící směsi prostřednictvím horkého vzduchu cirkulujícího skrz výměník. Pec se obvykle skládá ze tří až čtyř zón, které jsou vyhřívány plynovými hořáky.

Konvekční přehřívací část ohřívá výměník před vstupem do vyhřívací části pájecí pece. Její funkcí je ohřát komponenty bez ohledu na jejich rozměry a hmotnost na požadovanou teplotu. Přínos přehřívací pece je ve zlepšení flexibility pece umožňující zapájet komponenty různých rozměrů [21].

Sálavě vyhřívaná pájecí zóna je ideální pro pájení komponentů přibližně stejných rozměrů na průběžné pájecí lince. Jde o kontinuální muflovou pec, která je ohřívána shora a zespodu elektricky napájenými topnými články. Mufle je rozdělena na zóny, které jsou nezávisle na sobě kontrolovány, aby měly jednotnou teplotu v celé mufli. V této části pece dojde k samotnému zapájení [21][22].

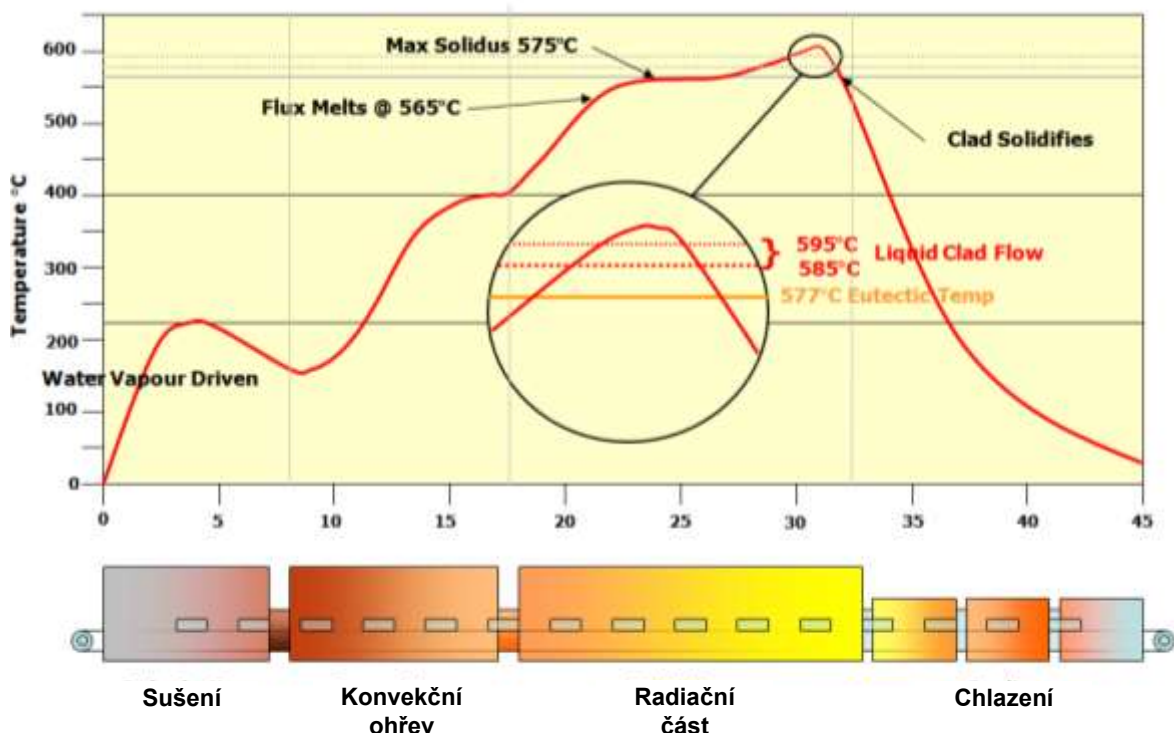
Nejprve dojde k roztavení tavidla při teplotě asi 562°C a tím i k rozrušení oxidické vrstvy. To umožní částicím křemíku přítomným v pájce dostat se do přímého kontaktu se základním materiálem. Při dalším vzestupu teploty se taví pájecí materiál, překročením teploty 577°C křemík rychle difunduje do povrchu základního materiálu a vytváří na povrchu vrstvu tekuté slitiny hliníku a křemíku blízké eutektickému složení. Teplota dále roste až k maximální hodnotě, ta se liší podle typu a velikosti tepelného výměníku (většinou její hodnota nepřesahuje 605°C). Pájka prostoupí štěrbinami díky kapilárním silám a vytvoří se spoj, viz Obr. 1.5.5.



Obr. 1.5.5 Schéma zapájení vlnovců a trubek.

Nevyužitá pájka zůstává na povrchu hliníku a vytváří vrstvu Al-Si blízkou eutektickému složení. Dojde-li k nárůstu teploty nad maximální danou hodnotu nebo setrvávají-li komponenty při maximální teplotě delší dobu než je stanoveno (zpravidla do tří minut), může dojít k nežádoucímu nárůstu zrn v pájených oblastech, které se pak stávají náchylné na korozi [23]. Výdrž na maximální teplotě po určitou dobu je nutná k rovnoměrnému prohřátí komponentů a tedy ke kvalitnímu zapájení celého výměníku.

Poslední operací celého pájecího procesu je ochlazení výměníku v chladicí komoře a výstup z pece, odkud je pájený výrobek odebrán a předán k dalšímu zpracování.



Obr. 1.5.6 Teplotní profil pájecího procesu v jednotlivých sekcích [16].

1.5.2 VLIV JEDNOTLIVÝCH OPERACÍ PÁJENÍ NA KOROZI

Z předchozího popisu jednotlivých operací pájení je zřejmé, že každá z nich má značný vliv na správné zapájení výrobku, což v závěru ovlivňuje jeho korozní odolnost, jak je popsáno níže. Není možné, aby jedna špatně nebo nedokonale provedená operace byla vykompenzována následnými podle předpisu provedenými operacemi.

Vlivem nedokonalého odmaštění může dojít ke vzniku pórů v pájených spojkách nebo dokonce nedojde k vytvoření pájeného spoje vůbec, a to z důvodu nedostatečného kontaktu tavidla s pájenou plochou. Pokud totiž nedojde k dokonalému zapájení, kdy v pájeném spoji mezi vlnovci a trubicí dojde ke vzniku pórů, nebo k špatnému tvaru spoje či k úplnému nezapájení, jsou tyto nedostatečné spoje při korozním napadení úplně degradovány a může dojít až k totálnímu oddělení součástí, což vede ke značnému snížení výkonu tepelného výměníku. Podobně to platí i pro pájený spoj mezi trubicí a bočnicí, dojde-li ovšem k netěsnosti, pak v tomto případě selhává celková funkce tepelného výměníku jako taková. Rovněž nedokonalé sušení má za následek pórovitost pájených spoju vlivem přítomné vody, která pak může reagovat s hliníkem za vzniku oxidického filmu. Následky jsou pak totožné. Při předehřevu může nastat nedokonalé prohřátí celého tepelného výměníku, což může vést k nárůstu zrn v přehřáté části a nedokonalému zapájení v nedostatečně předehřáté části. Při samotném pájení pak přehřátí může vést k značnému nárůstu zrn a k difuzi křemíku z pájených spoju až do základního materiálu. Při korozním napadení probíhá koroze přednostně po hranicích zrn, dochází až k úplnému vypadnutí velkých zrn, k degradaci spoju a opět k problémům týkajícím se výkonu případně funkce tepelného výměníku. Poslední operace chlazení by měla probíhat relativně rychle, aby při přetrvávajících vyšších teplotách zrna nerostla a nedocházelo tedy ke korozi po hranicích zrn, jak je uvedeno výše [23].

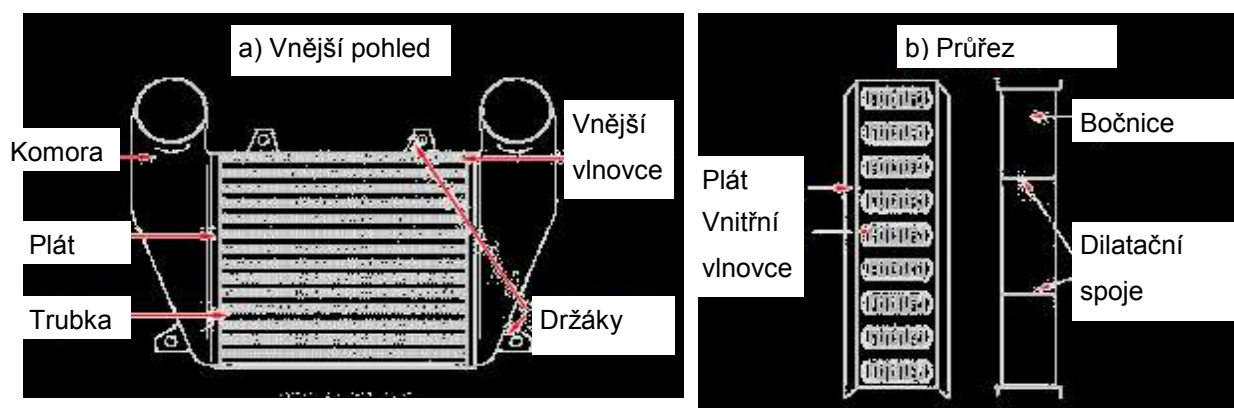
Je tedy zřejmé, že procesu pájení musí být věnována značná pozornost, aby se předešlo problémům s korozí.

1.5.3 KONSTRUKCE CHLADIČŮ PLNÍCIHO VZDUCHU

Chladiče plnicího vzduchu se vyrábí v různých velikostech a různém provedení podle aplikace. Pro všechny aplikace jsou však základní součásti stejné. Jedná se o:

- Vstupní a výstupní komoru
- Vložka, která se skládá z vnějších vlnovců, vnitřních vlnovců a trubek (plátů)
- Bočnice, která je k vložce připevněna a používá se k připevnění komory
- Držáky, kterými se chladič plnicího vzduchu připevní v motorovém prostoru
- Okrajové pláty

Ačkoli stejné modely chladičů mohou vypadat stejně, mohou se lišit v kvalitě použitých materiálů, pájecím procesu při výrobě a typem sestavy použité vložky. Tyto aspekty hrají významnou roli ve výkonu a životnosti. Schéma chladiče plnicího vzduchu je na obrázku, viz *Obr. 1.5.7*.



Obr. 1.5.7 Schéma chladiče plnicího vzduchu, a) vnější pohled, b) průřez [11].

Pro chladiče plnicího vzduchu lze použít dva základní typy trubek – extrudované trubky a svařované trubky. Tloušťka stěn trubek by měla být větší, aby trubky vydržely extrémní teploty, což se týká hlavně horní a spodní trubky. Navíc trubky s větší tloušťkou stěny déle odolávají koroznímu porušení z důvodu perforace. Svařované trubky se dodávají ve formě svitků, které se stříhají na pláty požadovaných rozměrů. Pláty se podélně ohnou a svaří. Extrudované trubky mají větší tloušťku stěny a vyšší hodnoty mechanických vlastností oproti svařovaným trubkám a to díky absenci svaru a také díky použití kvalitnějších slitin.

Vnitřní vlnovce slouží k usměrnění toku média a slouží ke zvýšení výkonu tepelného výměníku. Jejich hustota, umístění a vzdálenost určuje co nejúčinnější proudění vzduchu přes chladič plnicího vzduchu. Celkový výkon jednotky a úniky ovlivní zapájení trubek k bočnici.

Kvalita a pevnost materiálů používaných k výrobě vložky jsou důležité proto, aby vložka byla schopna vydržet rostoucí tlaky a provozní teploty. Bočnice může praskat, jsou-li použity lehké materiály, horní a spodní trubky s tenkou stěnou mohou shořet vlivem přehřátí. Navíc tenkostěnné trubky rychleji podléhají korozi [11].

1.6 HLINÍKOVÉ SLITINY STANDARDNĚ POUŽÍVANÉ PRO STAVBU TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ

Pro stavbu tepelných výměníků automobilů se používá hliníková slitina s hlavním legujícím prvkem manganem. Oproti hliníku o čistotě 99% má sice o něco nižší hodnoty fyzikálních vlastností, viz *Tab. 1.6.2*, a také nižší korozní odolnost, ale díky přidavku manganu do 1,5 hm.% vyšší pevnost. Srovnání mechanických vlastností slitin EN AW-1050A a EN AW-3003 ve stavech O a Hx8 je uvedeno v tabulce, viz *Tab. 1.6.1* [24].

Tvářené slitiny hliníku s manganem se podle evropské normy EN573-1 označují EN AW-3xxx. Běžně používané jsou EN AW-3003, EN AW-3103 nebo EN AW-3017, případně jejich modifikace. Hliníková slitina se tedy používá z důvodů dobrého poměru pevnosti a hmotnosti, dobré odolnosti vůči korozi a výborné tepelné vodivosti.

Nelegovaný hliník je výborný vodič tepla, jeho tepelná vodivost dosahuje hodnoty přibližně 60% hodnoty tepelné vodivosti mědi. Tepelná vodivost hliníkových slitin pak závisí na jejich složení a metalurgickém zpracování (žíhání, stárnutí apod.).

Průmyslové slitiny 3xxx série obsahují mezi 1-1,5% manganu. Tento prvek značně zlepšuje mechanické vlastnosti hliníku a zvyšuje o 40-50 MPa minimální garantovanou hodnotu pevnosti v tahu, přičemž dobrá tvařitelnost zůstává zachována. Mangan dále zajišťuje dobrou odolnost vůči korozi a schopnost hlubokého tažení. Nejlepších plastických vlastností dosahuje tato slitina ve stavu O, tedy ve stavu žíhaném [25].

Tab. 1.6.1 Srovnání vybraných mechanických vlastností plechů vyrobených z materiálů EN AW-3003 a EN AW-1050A ve stavech O (žíhaný) a Hx8 (mechanicky zpevněný) [24].

Slitina	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min.	Mez pevnosti R_m [MPa] min. – max.	Tažnost A_{50mm} [%] min.	Tvrdost [HBW]
3003-O	35	95 - 135	15	28
3003-Hx8	170	Min. 190	1	60
1050A-O	20	65 - 95	20	21
1050A-Hx8	120	Min. 135	1	42

Z dalších prvků je v těchto slitinách obsažena měď, křemík, zinek a železo. Obsah mědi ve slitině 3003 může dosahovat až 0,2%, čímž dochází k dalšímu zvýšení mechanické odolnosti. Dalším zvýšením obsahu mědi lze pak získat jemnozrnnou strukturu. Měď značně snižuje korozní odolnost hliníkových slitin, ovšem může působit i pozitivně tvorbou méně ušlechtilých pásů (obětovaná anoda), jak je podrobněji uvedeno v kapitole 5.2.

Křemík je v této slitině přítomen maximálně do 0,6% a železo do 0,7%. Oba tyto prvky jsou v hliníkových slitinách obsaženy vždy a označují se jako nečistoty [27].

Dalším legujícím prvkem v těchto slitinách je zinek, jeho obsah činí maximálně 0,2%. Zinek zlepšuje mechanické vlastnosti na úkor korozní odolnosti, podobně jako u mědi lze však této nevýhody využít pro katodickou ochranu základního materiálu nanesením povlaku zinku (např. námi

použitá slitina EN AW-3003+1.5% Zn, viz kap.6.1), kdy koroze probíhá přednostně právě ve vrstvě obsahující zinek z důvodu jeho menší ušlechtilosti vůči zoxidovanému hliníku. Zinek se nanáší chemicky ponořením do taveniny nebo tepelným nástřikem.

Tab. 1.6.2 Některé fyzikální vlastnosti hliníku o čistotě 99,99% a slitiny EN AW-3003.

	Čistý hliník	Slitina 3003
Teplota tavení, T_m (°C)	660,4	643-654
Hustota, ρ (kg.m⁻³)	2698,9	730
Délková roztažnost, α (μm.m⁻¹.K⁻¹) 20-10°C	24	232
Specifické teplo, c (J.kg.C⁻¹)-10°C	900	893
Youngův modul, E (MPa)		69000
Tepelná vodivost, λ (W.m⁻¹.K⁻¹) při 20°C	47	193 (O) 163(H12) 159(H14)
Elektrický odpor, ρ (10⁻³ μΩ.m) při 20°C	2	34(O) 41(H12) 42(H14)

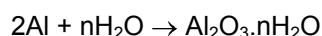
Další prvky, které se přidávají v malých množstvích (obvykle méně než 1%), se označují jako aditiva a mají za úkol např. zmenšit velikost zrna po pájení, svařování apod., zlepšit svařitelnost atd. Zpravidla se jedná o zirkonium, titan, berylium, chrom, nikl [27]. Složení slitiny EN AW-3003 je uvedeno níže, viz Tab. 1.6.3.

Tab. 1.6.3 Chemické složení slitin EN AW-3003, EN AW-3103 a EN AW-3017 [26].

Slitina	Složení (hm.%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní
3003	0.6	0.7	0.05-0.2	1-1.5	-	-	0.1	-	0.15
3103	0.5	0.7	0.1	0.9-1.5	0.3	0.1	0.2		0.15
3017	0.25	0.25-0.45	0.25-0.4	0.8-1.2	0.1	0.15	0.1	0.05	0.15

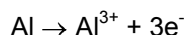
1.7 KOROZE HLINÍKU

Hliník obecně má výbornou odolnost vůči korozi v přirozeném prostředí, v čerstvé i mořské vodě, v mnoha solích a chemikáliích. Tato odolnost je způsobená vznikem pasivního ochranného oxidického filmu, který vzniká okamžitou reakcí hliníku s kyslíkem nebo vodou, dochází k tvorbě souvislé vrstvy, která brání dalším reakcím hliníku s prostředím.

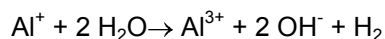


Hliník tedy vytváří na povrchu vrstvu oxidu hlinitého Al_2O_3 o tloušťce několika nanometrů. Při dlouhodobé expozici ve vlhkém vzduchu se na hliníku tvoří boehmit AlOOH a následně různé hydratované oxidy hliníku a hydroxidy hliníku. Jejich stabilita klesá s klesající hodnotou pH. Jejich rozpuštěním vznikají kationty Al^{3+} . Hliník má schopnost tvořit korozní produkty obsahující kyslík jako jsou zásadité nebo hydratované sírany hliníku, které jsou špatně rozpustné, amorfni a silně ochranné. Při poškození se okamžitě obnoví. Pokud jeho znovu-vytvoření není možné, dochází ke vzniku koroze. Rychlost atmosférické koroze je ovlivněna obsahem chloridových iontů, které zapříčiňují lokální napadení [31].

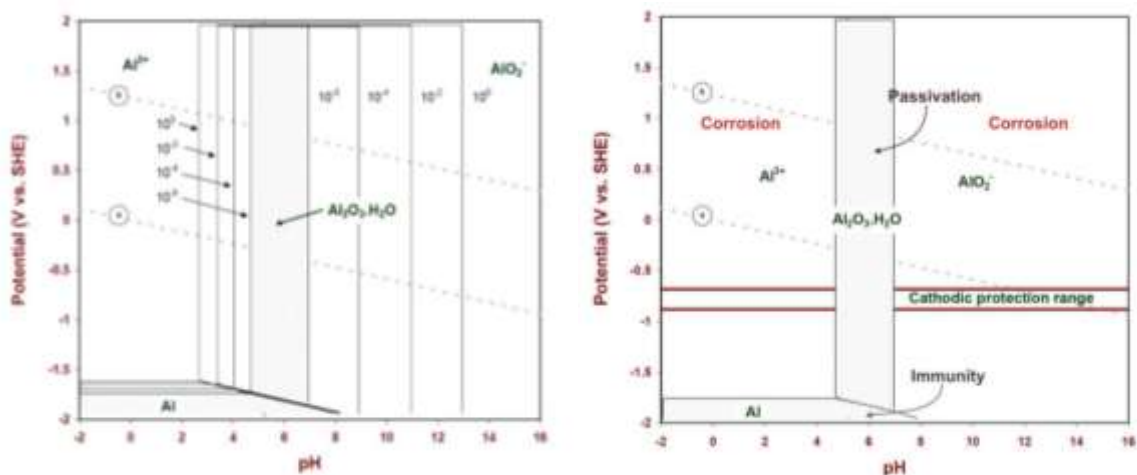
Koroze je chemická reakce kovu, v našem případě hliníku, s jeho prostředím, které vede k degradaci vlastností hliníku. Jde o kov neušlechtilý s rovnovážným potenciálem -1663 mV podle reakce:



Současně vzniká i Al^+ , ten pak reaguje s vodou:



Z termodynamického hlediska je koroze termodynamická nestálost kovů v různých prostředích, kdy kovy přecházejí do stálejších stavů zplodin koroze. Míru pravděpodobnosti koroze udává množství energie uvolněné během korozního děje. Termodynamickým vyjádřením umožňujícím předem definovat podmínky, za kterých je koroze možná, jsou rovnovážné diagramy potenciál – pH podle Pourbaixe [25]. Chemická rovnováha hliníku a vody je uvedena níže, viz Obr. 1.7.1, kde jsou uvedeny rovnovážné fáze pro tento systém při různých hodnotách pH a potenciálech.

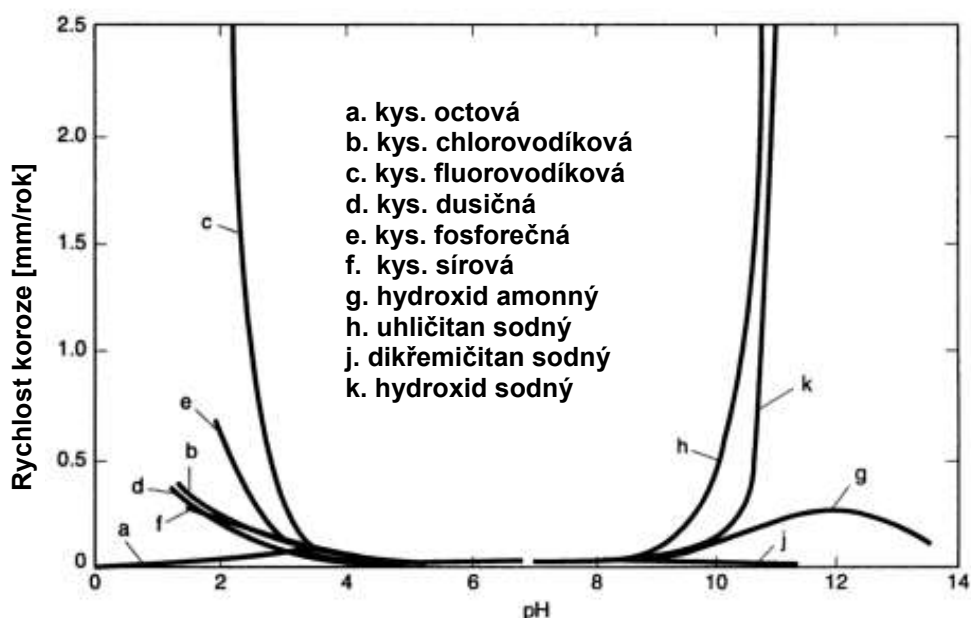


Obr. 1.7.1 Pourbaixův diagram E -pH pro hliník [29].

Oblast stability vody je ohraničena čárkovaně liniemi (a) a (b), pod vodíkovou linií (a) již není voda stabilní a rozkládá se na vodík a hydroxid. Nad linií (b), označovanou jako kyslíková, se voda rozkládá na kyslík a vodík. V prostředí vyskytující se běžně kolem nás je voda stabilní, tedy mezi liniemi (a) a (b). V kyselých prostředích při nízkém pH se hliník rozpouští za vzniku Al^{3+} , kdežto v zásaditých s vysokým pH se hliník rozpouští jako AlO_2^- . V neutrálních prostředích při hodnotách pH od 5 do 7 je materiál chráněn pasivním oxidickým filmem Al_2O_3 vytvořeným na povrchu materiálu.

Podle tohoto diagramu tedy nedochází ke korozi hliníku v čerstvé vodě za předpokladu, že v ní nejsou přítomny chloridy [30]. Koroze probíhá v kyselinách i zásadách.

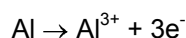
Efekt vlivu pH na korozi slitiny 1100-H14 je uveden v grafu, viz Obr. 1.7.2, kde je zřejmé, že se daná slitina rychle rozpouští jak při nízkých tak vysokých hodnotách pH vlivem nestability oxidu hlinitého a hydroxidového filmu.



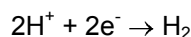
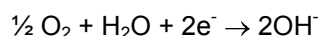
Obr. 1.7.2 Vliv pH na rychlost koroze hliníkové slitiny 1100-H14 v různých chemických roztocích [32].

Pourbaixův diagram nám tedy definuje podmínky, za kterých dochází ke korozi, ale neříká nic o rychlosti korozního napadení. Navíc v případě neutrálního pH roztoku může přesto docházet ke korozi lokální ve formě důlků nebo štěrbin, které mohou mít odlišnou hodnotu pH a jinou koncentraci chloridů oproti okolnímu roztoku.

Protože je koroze hliníku elektrochemickou reakcí, je nutný přenos elektronů z jedné strany – anody – na stranu druhou – katodu. Anodou se rozumí rozpouštějící se hliník, uvolňující elektrony, a katodou místa přijímající uvolněné elektrony. Anodické rozpouštění hliníku je vyjádřeno reakcí:

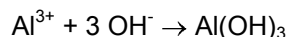
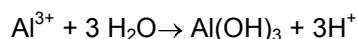


Katodické reakce přijímající uvolněné elektrony jsou ve vodě možné dvě a to:



Přítomnost kyslíku způsobuje vznik hydroxidového aniontu OH^- a zapříčiňuje nárůst hodnoty pH na povrchu. Redukce kyslíku je rychlá reakce vznikající na nečistotách jako jsou precipitáty železa a mědi v hliníkové matici. To je hlavním důvodem, proč má čistý hliník vyšší korozní odolnost než jeho slitiny obsahující sekundární fáze intermetalických částic. Pokud není ve vodě přítomen kyslík, druhou katodickou reakcí pak vzniká vodík. Tato reakce je pomalá, ale to neplatí pro kyselá prostředí. Rovněž tato reakce způsobuje nárůst hodnoty pH na povrchu hliníku [30].

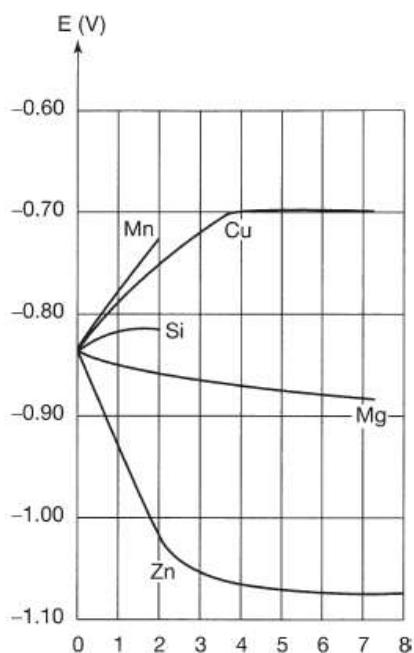
Jakmile se uvolní kationty hliníku do vodného roztoku, může dojít k jejich difúzi do jiné oblasti, kde se z roztoku vysráží jako hydroxid hlinitý v podobě bílého gelu podle reakcí:



Po vysušení tvoří korozní produkty ve formě bílého prášku. Tvorba hydroxidu hlinitého způsobuje okyselení dané oblasti.

1.7.1 VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ

Jak již bylo uvedeno výše, nejvyšší korozní odolnost má vysokočistý hliník. Příměsi snižují jeho korozní odolnost, protože až na výjimky jsou vůči hliníku katodou. Výjimkou je například mangan, jehož příznivé působení na korozní odolnost je způsobené vznikem intermetalidu $(\text{MnFe})\text{Al}_6$, kdy navázáním železa dochází k vyloučení jeho negativního vlivu na korozi. Působení nečistot na korozní odolnost závisí na daném elektrolytu a rovněž na formě jejich vyloučení ve slitině, zda jsou přítomny v tuhém roztoku nebo vyloučené na hranicích zrn. Účinek intermetalických fází přítomných ve slitinách hliníku je dán jejich elektrodovým charakterem vůči hliníku, například intermetalika FeAl_3 , CuAl_2 , MnAl_6 aj. jsou v roztoku 3% soli NaCl katodami, mohou tedy narušit celistvost pasivní vrstvy a tím vytvořit podmínky pro vznik bodové koroze. Kdežto intermetalika typu Mg_2Si , Al_2MgSi aj. jsou anodového charakteru. Pokud se vyloučí na hranicích zrn, dojde k jejich rozpuštění [25].



Obr. 1.7.3 Vliv hlavních legujících prvků na potenciál hliníku [28].

Účinek hlavních legujících prvků na korozní potenciál vysoce čistého hliníku je uveden výše, viz Obr. 1.7.3. Většina komerčních slitin hliníku však obsahuje více legujících prvků, u kterých platí, že s rostoucím obsahem prvků v tuhém roztoku tento potenciál v absolutní hodnotě narůstá. Množství prvků rozpuštěných v tuhém roztoku, zvláště pro složení s více legurami, závisí i na výrobě a tepelných procesech, které mohou ovlivnit konečný potenciál finální slitiny. V následující tabulce, viz Tab. 1.7.1, jsou uvedeny potenciály komerčních nevytvrditelných hliníkových slitin, jejichž potenciál je stejný pro různé stavy dané slitiny a pro tepelně vytvrditelné slitiny, jejichž potenciál se liší podle definovaného stavu [29].

Tab. 1.7.1 Korozní potenciály vybraných tvářených slitin [29].

Tepelně nevytvrditelné		Tepelně vytvrditelné	
Slitina	Potenciál (V)	Slitina	Potenciál (V)
1060	-0,84	2014 T4	-0,69
1100	-0,83	2014 T6	-0,78
3003	-0,83	2024 T3	-0,69
3004	-0,84	2024 T6	-0,81
5050	-0,84	6061 T4	-0,80
5052	-0,85	6061 T6	-0,83
5154	-0,86	6151 T6	-0,83
5454	-0,86	7005 T6	-0,94
5083	-0,87	X7021 T6	-0,99

V některých případech je překvapivě účinek legujících prvků na korozní odolnost hliníku ve velmi čisté vodě za zvýšených teplot opačný než při pokojové teplotě. Prvky (včetně nečistot) snižující korozní odolnost za pokojové teploty ji zlepšují za zvýšených teplot. Nejdůležitější faktory ovlivňující korozivitu čerstvé vody působením na hliník jsou teplota vody, pH, vodivost, existence katodického reaktantu, přítomnost nebo absence těžkých kovů a korozní potenciál daných slitin [31].

Korozi hliníku a jeho slitin lze podle charakteru působení rozdělit na rovnoměrnou a lokalizovanou. Rovnoměrná koroze u hliníku se nejprve projevuje jako důlky s velmi malým poloměrem v řádech mikrometrů, pak následuje rovnoměrný a postupný úbytek na celém povrchu kovu. Tento typ koroze se u hliníku vyskytuje ve vysoce kyselých nebo zásaditých prostředích, ve kterých je rozpustnost oxidického filmu vysoká. Rychlost rozpustnosti oxidického filmu je větší než jeho tvorba, ovšem jejich poměr se může měnit v čase. Rychlost rovnoměrné koroze se dá jednoduše určit stanovením úbytku hmotnosti nebo množstvím uvolněného vodíku.

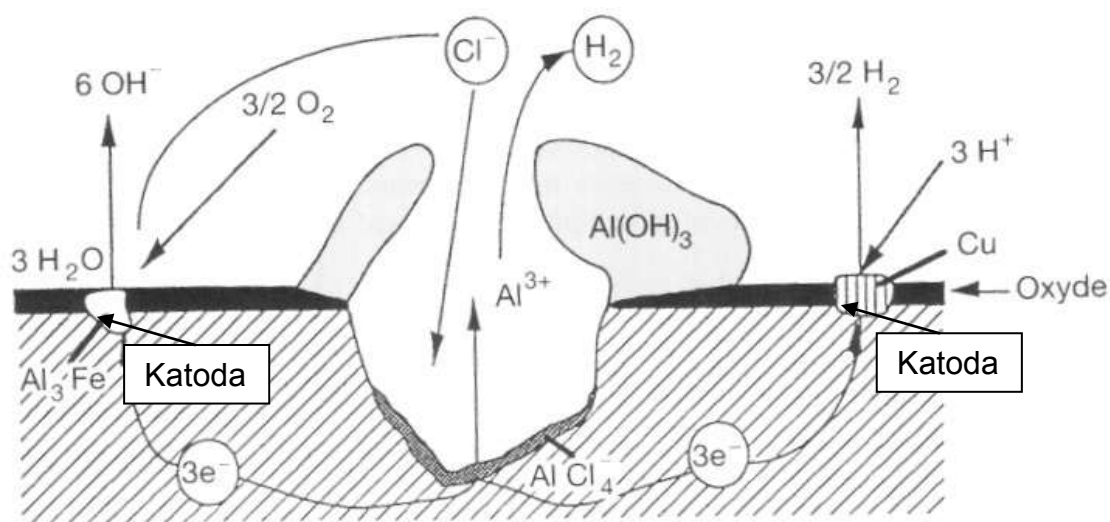
Ostatní typy korozního napadení, které nejsou distribuovány rovnoměrně na povrchu, lze označit za lokalizovanou korozi. Toto korozní napadení je zrádné ve své nepředvídatelnosti. V následujících kapitolách je popsána koroze bodová a mezikrystalová nejčastěji se vyskytující u tepelných výměníků vyrobených ze slitin hliníku.

1.7.2 BODOVÁ KOROZE

Bodová koroze (důlková koroze) je lokalizovanou formou koroze, která je charakteristická tvorbou tvarově nepravidelných kavit na povrchu kovu. Jejich průměr a hloubka závisí na několika parametrech souvisejících s kovem, prostředím a provozními podmínkami. Bodová koroze vzniká za přítomnosti chloridů, kdy dochází k lokálnímu porušení pasivní vrstvy s možností vzniku mikročlánků. Bodová koroze obvykle vzniká v prvních týdnech expozice. Podle [28] lze rozlišit dvě stádia - iniciaci a propagaci. Podle [31] lze rozlišit stádia tři - nukleaci, metastabilní tvorbu důlku a ustálenou důlkovou korozi.

Ve fázi iniciace jsou chloridové ionty Cl^- adsorbovány na přirozeném oxidickém filmu v místech, kde došlo k oslabení ochranné vrstvy, ať už mechanickým poškozením nebo strukturou

materiálu (vměstky, hranice zrn). Korozní proces je autokatalytický. Důlek vzniká v místě porušení, kde dochází k nárůstu koncentrace agresivních iontů. Hodnota pH se snižuje vlivem hydrolyzy korozních produktů, čímž dochází k neustálému nárůstu agresivity prostředí v důlku. Ten se dále šíří a z důvodu malé velikosti ústí nemůže docházet k výměně roztoku uvnitř důlku. Jeho vnitřní povrch aktivně koroduje, je obětovanou anodou pro ostatní pasivní povrch [V1]. Zvýšená koncentrace agresivního iontu, zvýšená teplota, nízká hodnota pH a přítomnost oxidujících složek umožňuje vznik a šíření bodové koroze [63]. Většinou vzniká mnoho důlků během velmi krátké doby. Jejich hustota závisí na složení slitiny (10^4 cm^{-2} pro slitinu 1199, u slitin se 4% obsahem mědi 10^{10} cm^{-2}). Většina důlků přestane růst po několika dnech, jelikož dochází k jejich repasivaci. Je-li kov opět vystaven polarizaci, iniciace důlků již na repasovaných důlcích neprobíhá, ale začne na nových místech. Kyslík je pomalu redukován v katodických oblastech. Tyto oblasti jsou intermetalické fáze pod oxidickým filmem (např. Al_3Fe). Kde dojde k poškození filmu, tam okamžitě probíhá oxidace a dochází k tvorbě přechodného stavu chloridu AlCl_4^- [28]. Mechanismus důlkové koroze je znázorněn níže, viz Obr. 1.7.4.



Obr. 1.7.4 Mechanismus důlkové koroze hliníku [28].

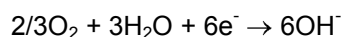
Jen nepatrný podíl vzniklých důlků bude pokračovat v šíření – propagaci – podle následujících dvou reakcí:

- Oxidace na anodě probíhající na dně důlku:

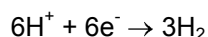


- Redukce na katodě probíhající mimo důlek:

Redukce vody:

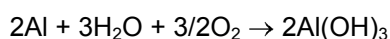


Redukce H^+ :

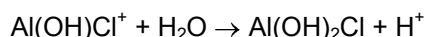


Je-li anoda stabilní, koroze bude napadat důlek. Tvorba OH^- iontů nebo spotřeba H^+ iontů povede místně k nadbytku OH^- iontů a tím k alkalickému pH.

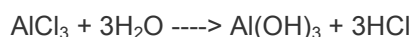
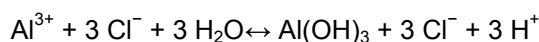
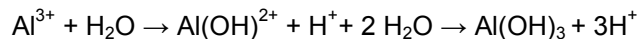
Souhrnná reakce důlkové koroze pro hliník je:



Uvnitř důlku mohou vznikat 2 druhy soli, AlCl_3 a $\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$ případně $\text{Al}(\text{OH})\text{Cl}_2$ [31].



Rozpuštěním hliníku za tvorby Al^{3+} iontů na dně důlků vzniká elektrické pole, které posouvá Cl^- ionty směrem ke dnu důlku. Roztok se stává chemicky vyváženým a vytvoří se chloridy hlinité- AlCl_3 . Hydrolyza chloridu hlinitého vede k okyselení dna důlků na hodnoty $\text{pH} < 3$:



Prostředí se stává velice agresivním, vede k dalšímu růstu důlku. Ionty Al^{3+} budou vysoce koncentrovány na dně důlku, budou difundovat k jeho ústí, kde přichází do styku s prostředím, které je stále víc zásadité hlavně na bočních plochách, kde katodické reakce vedou k alkalizaci. Hydroxid hlinitý se bude usazovat. Mikrobubliny vodíku z redukce iontů H^+ budou tlačit vytvořený $\text{Al}(\text{OH})_3$ k otevření důlku, kde se tvoří nános bílého gelu. Proto vykazují reagující složky koncentrační gradient z povrchu k okraji důlku. Nahromadění korozních produktů na povrchu důlku ve tvaru sopky bude postupně blokovat ústí důlku. Tím se zabrání výměně iontů, zejména jsou-li přítomny Cl^- ionty, což vysvětluje, proč dochází ke zpomalení či dokonce zastavení důlkové koroze.

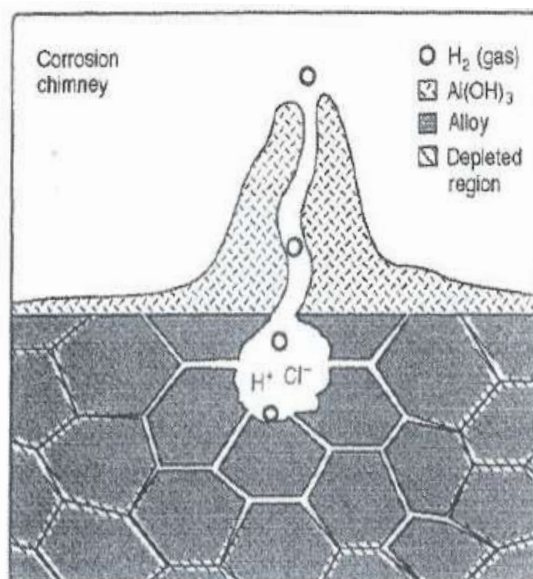
V přirozeném prostředí jsou všechny hliníkové slitiny náchylné k důlkové korozi. Odolnost vůči této korozi je vyšší, je-li hustota iniciačních důlků vysoká. Ke slitinám 3003 se přidává malé množství mědi (0,1-0,2%) za účelem vytvoření většího počtu iniciačních míst na intermetalických fázích Al_2Cu [28].

1.7.3 MEZIKRYSTALOVÁ KOROZE

Dalším poměrně častým typem nerovnoměrné koroze u hliníkových slitin používaných v automobilovém průmyslu je mezikrystalová koroze, která má zásadní vliv na odolnost vůči korozi z důvodu strukturních změn kovu. Mezikrystalová koroze probíhá na hranicích zrn kovu nebo v oblasti, která k nim přiléhá. Příčinou je strukturní a chemická nehomogenita kovu na hranicích zrn, vlivem difuze atomů a precipitace částic sekundární fáze při tepelném zpracování, stárnutí nebo svařování [28]. Tato koroze často vzniká v místech počínající štěrbínové nebo bodové koroze, protože kyselé prostředí důlku vede k přednostnímu napadení oblastí hranic zrn, viz Obr. 1.7.5 [30]. Jejím působením pak dochází ke ztrátám mechanické pevnosti, přičemž na povrchu kovu nemusí být toto napadení viditelné. Je to zapříčiněno přednostně korodující hranicí zrn a následnou ztrátou soudržnosti, přičemž rychlost koroze po hranicích zrn je vyšší než koroze vlastního zrna.

U hliníkových slitin působí příměsi vyloučené na hranicích zrn jako aktivátory koroze, které mohou fungovat buď jako katody nebo anody. Mezikrystalová koroze se projevuje zejména u slitin hliníku typu 2xxx, 5xxx, 7xxx, méně často pak u 6xxx, ale může nastat i u čistého hliníku a to ve vodě při teplotě nad 160°C , kde hranice zrn působí vůči matici jako katody [21].

Citlivost k tomuto typu koroze u slitin vhodných pro tepelné zpracování závisí nejen na chemickém složení slitiny, ale rovněž i na způsobu její výroby, tepelném zpracování, kalení a umělém precipitačním vytvrzování, protože při těchto procesech dochází k precipitaci intermetalik na hranicích zrn, čímž je zapříčiněn rozdíl v korozním potenciálu hranic zrn a matrice [34].



Obr. 1.7.5 Kyselé prostředí důlku (pittingu) vede k přednostnímu rozpouštění oblasti hranic zrn [30].

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU KOROZNÍHO TESTOVÁNÍ TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ

Korozních zkoušek existuje celá řada. Je to dáno jednak množstvím různých materiálů a také různorodostí prostředí, ve kterých se dané materiály používají. Aby zkoušky poskytovaly srovnatelné výsledky, musí se provádět ve stanovených podmínkách, které jsou definovány normami. Nejpresnějších výsledků o korozním chování materiálů blížících se reálným podmínkám lze dosáhnout dlouhodobými zkouškami, které co nejvíce napodobují provozní podmínky. Ovšem z důvodu úspory finančních prostředků i času se často přistupuje k laboratorně modelovým nebo urychleným testům, které simulují provozní podmínky působící na materiál ovšem v mnohem kratších časech, než je reálná doba provozu. Tyto zkoušky ověří účinnost korozních ochranných systémů a odhalí defektní místa, avšak korozní namáhání při těchto zkouškách se může značně lišit od možných korozních namáhání v praktickém provozu, kde pak může koroze probíhat podle jiných mechanismů. Výsledky těchto laboratorních zkoušek tedy nelze považovat za přímý návod k použití testovaných materiálů ve všech prostředích, protože některé faktory ovlivňující průběh koroze se mohou za jiných podmínek lišit. Jde například o podmínky umožňující vznik ochranných filmů. Nicméně korozní zkoušky poskytují informace o srovnání kvality kovových materiálů, ať už s korozní ochranou nebo bez ní [35].

Expoziční korozní testy se mohou provádět na vzorcích nebo přímo na výrobcích respektive jejich komponentech v různých podmínkách: v atmosféře kondenzující vlhkosti bez nebo se znečištěním (SO_2), v rozprašované solné mlze různého složení, ponorové zkoušky v roztocích při trvalém nebo střídavém ponoru, v plynném prostředí atd. Jednotlivé normy pak přesně definují všeobecné zásady, tedy použití pro určité aplikace, popis testovacího zařízení, dále požadavky na testované vzorky, specifikace korozního prostředí, korozní prostředí (roztoky), postup zkoušky a záznam údajů samotné zkoušky a konečně i způsob vyhodnocení.

2.1 STANDARDNÍ METODY KOROZNÍCH TESTŮ TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ

Tepelné výměníky jsou zpravidla testovány podle specifikací ASTM G85 (A3), PV 1208, PV 1209, ASTM B117 a EN ISO 9227. Prováděné korozní zkoušky se mohou jemně odlišovat od zmíněných specifikací a to na základě požadavků zákazníků. Ti si zpravidla sami určují dobu, po kterou musí vyrobené tepelné výměníky vydržet v testovací komoře bez poškození, aby mohly být schváleny pro použití.

Zmíněné testy se liší jak ve složení roztoku, tak v době trvání, cyklování a zejména v pH hodnotách zkušebního roztoku.

ASTM G85 (A3) označovaný jako SWAAT (sea water acetic acid test) je cyklický korozní test sestávající z různě dlouhých cyklů za různých podmínek v prostředí rozprašované okyselené solné mlhy specifického složení. Po dobu 30 minut je na vzorky rozprašována mlha roztoku, viz *Tab. 2.1.1*, pak následuje 90 minut kondenzace při konstantní teplotě 49°C. Relativní vlhkost při kondenzaci by měla být 98-100% [36]. Nižší vlhkost významně ovlivňuje výsledky testu v negativním smyslu. Délka testu je dána požadavkem zákazníka, zpravidla se pohybuje v rozmezí 300-1000 hodin.

Často používanou metodou pro hodnocení korozní odolnosti tepelných výměníků je specifikace společnosti Volkswagen označována jako PV 1208. Jedná se opět o SWAAT, tedy cyklickou zkoušku v prostředí rozprašované okyselené solné mlhy, kdy se stejně jako v předchozí uvedené normě ASTM G85 A3 střídají 30 minutové cykly rozprašování s 90-ti minutovými cykly kondenzace ovšem při teplotě $50\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Další metodou vhodnou pro testování tepelných výměníků, definovanou společností Volkswagen, je specifikace PV1209, která je kombinací specifikací PV 1200 a PV 1210. Jde o 12-ti týdenní cyklickou zkoušku, kdy se jeden týdenní cyklus skládá z:

- 5 dnů testování v korozní komoře podle PV 1210:
 - 4 hodiny rozprašování solné mlhy při 35°C
 - 4 hodiny chlazení na pokojovou teplotu při 40-60% relativní vlhkosti
 - 16 hodin kondenzace při 100% relativní vlhkosti.
- 2 dny testování v klimatické komoře podle PV 1200:
 - 4 hodiny výdrž na teplotě 80°C při relativní vlhkosti 80%
 - 4 hodiny výdrž na teplotě -40°C
 - Doba ohřevu a chlazení 2 hodiny.

Korozní test podle ASTM B117 je nejznámější standardní test v nepřetržité rozprašované neutrální solné mlze s pH 6,5-7,2 při teplotě $(35\pm 2)^{\circ}\text{C}$ [37]. Stejně jako u předchozího testu je doba expozice uvedena v materiálových nebo výrobních specifikacích (údaje poskytuje zákazník). Obvyklá délka testu je v rozmezí 1000-1200 hodin.

Mezinárodní norma ISO 9227 uvádí 3 zkušební metody, specifikuje zařízení, zkušební roztoky a postupy, jak provádět zkoušky pro posouzení odolnosti kovových materiálů proti korozi, a to v neutrální solné mlze (NSS), v okyselené solné mlze (AASS) a v okyselené solné mlze s přídavkem CuCl_2 (CASS).

Korozní zkouška NSS v neutrální solné mlze je vhodná k testování kovů a jejich slitin a různých druhů povlaků na kovových materiálech (kovových, konverzních, anodických a organických povlaků). Pro zkoušení dekorativních povlaků, případně anodických povlaků na hliníku, je vhodná zkouška AASS v okyselené solné mlze nebo CASS v okyselené solné mlze s přídavkem CuCl_2 [38]. Složení rozprašovaných roztoků a hodnoty pH výše zmíněných testů jsou uvedeny v tabulce, viz *Tab. 2.1.1*.

Tab. 2.1.1 Složení rozprašovaných roztoků a hodnoty pH pro testy ASTM G85 A3, ASTM B117 a EN ISO 9227 [36][37][38].

	ASTM G85 (A3)	ASTM B117	PV 1208	PV 1209	ISO 9227		
					NSS	AASS	CASS
	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l
Chlorid sodný NaCl	24,534	50	42	40	50	50	50
Dihydrát chloridu měďnatého $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	-	-	0,26
Chlorid hořečnatý $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	11,111	-	-	-	-	-	-
Síran sodný Na_2SO_4	4,094	-	-	-	-	-	-
Chlorid vápenatý CaCl_2	1,159	-	-	10	-	-	-
Chlorid draselný KCl	0,695	-	-	-	-	-	-
Hydrogenuhličitán sodný NaHCO_3	0,201	-	-	-	-	-	-
Bromid draselný KBr	0,101	-	-	-	-	-	-
Kyselina boritá H_3BO_3	0,027	-	-	-	-	-	-
Chlorid strontnatý $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,042	-	-	-	-	-	-
Fluorid sodný NaF	0,003	-	-	-	-	-	-
	ml/l						
Kyselina octová CH_3COOH	10	-	10	-	Úprava hodnoty pH přidavkem kyseliny octové (CH_3COOH), případně hydroxidem sodným (NaOH).		
pH	2,8 - 3,0	6,5 - 7,2	2,8 - 3,0*	6,5 - 7,2**	6,5 - 7,2	3,1 - 3,3	3,1 - 3,3
Teplota T [°C]	49	35±2	50±1	35/40/25 80/-40	35±2	35±2	50±2

*Úprava pH přidavkem hydroxidu sodného (NaOH)

**Úprava pH zředěnou kyselinou chlorovodíkovou (HCl)

Expoziční korozní testy tepelných výměníků mají za úkol napodobit působení okolního prostředí při provozu automobilu. Okolní prostředí a jeho agresivita se samozřejmě liší jak s ročním obdobím, tak s geografickými oblastmi. V zimních měsících se pro údržbu komunikací používají různé posypové látky včetně solí s obsahem chloridů, které se při provozu vozidla dostávají přímo na tepelné výměníky, zejména pak na chladič a kondenzátor, které jsou umístěné přímo za maskou vozu. Dalším výše zmíněným faktorem jsou různé geografické oblasti, kde je vůz používán. V přímořských oblastech je vyšší obsah solí ve vzduchu, ty se pak prouděním vzduchu při provozu opět dostávají přímo na tepelné výměníky. Rovněž oblasti s vysokou průmyslovou koncentrací obsahují ve vzduchu množství látek (oxid siřičitý, oxidy dusíku, benzopyren a jiné), které mohou negativně ovlivnit korozní odolnost tepelných výměníků. Všechny tyto aspekty byly brány v potaz při návrhu korozních testů.

K ověření vhodného výběru hliníkových slitin pro chladiče stlačeného vzduchu jsou používány korozní testy, které simulují provozní podmínky vozidla. Tyto korozní testy jsou zaměřeny na **externí korozi**, tzn. korozní napadení vnějšího povrchu výměníku.

Chladič plnicího vzduchu v nízkotlakém systému EGR je však enormně zatížen i korozním prostředím, které vzniká uvnitř v důsledku vstupu chemických látek ze spalovacího procesu a způsobuje tzv. „**interní korozi**“, to znamená korozní napadení vnitřního povrchu plátů, vlnovců a pájených spojů mezi nimi. Chování chladiče plnicího vzduchu zatíženého těmito podmínkami není doposud přesně popsáno. Na základě výsledků realizovaných zkoušek budou predikovány podmínky pro testování materiálů používaných pro stavbu chladičů plnicího vzduchu v korozně agresivním prostředí nízkotlakého systému recirkulace spalin. Pro praktické použití této aplikace bylo nutné provést:

- Výzkum dané problematiky
- Formulace testů pro chladiče plnicího vzduchu použité v tomto systému a vyhodnocení výsledků testů
- Doporučení vhodného materiálu chladiče plnicího vzduchu pro tuto aplikaci.

Řešení těchto úkolů bylo předmětem této práce.

2.2 SPECIFIKACE VDA

V současné době lze testování nízkotlakého EGR okruhu a jeho komponentů provádět na skutečných automobilech – zpravidla vývojových prototypch, dále v laboratorních podmínkách na systémových zařízeních či nějakou alternativní metodou, podchycující základní parametry chemického prostředí vznikajícího v chladiči stlačeného vzduchu.

Stávající metodika testování však neumožňuje dostatečné vyhodnocení materiálů pro užití v aplikaci nízkotlakého EGR okruhu, protože je zaměřena primárně na studium a vyhodnocení externí koroze, přičemž v případě vzniku kyselin uvnitř tepelného výměníku nelze tyto údaje relevantně vyhodnotit [51]. Výjimku ve specifikacích tvoří norma VDA 230-214, která popisuje proces korozního testování kovových materiálů a povrchů určených pro použití v systému zpětné recirkulace spalin. Testování podle této specifikace však zatím není standardně prováděno, pro jeho provedení je nutno postavit testovací zařízení, neboť korozní zkoušku podle VDA 230-214 nelze provést v klasické korozní komoře. Test se skládá z následujících opakujících se týdenních cyklů:

- 1.den:
 - Vyjmutí vzorku z komory
 - Vyhodnocení
 - Dokumentace
 - Tepelné stárnutí 5 h při teplotě (300, 400, 500 nebo 600°C)
-
- 2. – 7.den:
 - Teplota komory 50°C po celou dobu testu
 - 8 h vypařovací fáze
 - 6 h vzorky částečně ponořeny v kondenzátu
 - 2 h sušení
 - 8 h vypařovací fáze

Specifikace doporučuje šestitýdenní testování a uvádí 4 typy kondenzátů. Dva jsou vysoce agresivní s hodnotou pH 1.2 a jsou navrženy pro testování nerezových součástí systému EGR a dva s hodnotou pH 3.5 vhodné pro hliníkové komponenty. Kondenzáty se shodnou hodnotou pH se liší v množství přídavku chloridu sodného, viz Tab. 2.2.1. Výsledky této zkoušky poskytují informaci o náchylnosti ke korozi při vystavení zkoušeného materiálu výfukovým spalinám. V této normě je stanoven nově vyvinutý přesně definovaný postup testování včetně testovacího kondenzátu, ovšem ten se během provozu automobilu může měnit a to v závislosti na podmínkách jízdy (rychlosti), na stavbě motoru, na typu paliva apod. Proto bylo jedním z cílů této dizertační práce nalézt takový kondenzát, který by se co nejvíce přiblížil reálným podmínkám.

Tab. 2.2.1 Složení kondenzátů podle VDA 230-214 [45].

Zkušební roztok č.	Složení zkušebního roztoku			Výměna roztoku během testu
K1.1	Agresivní systém pH=1	Báze-anorganické kyseliny: - 3.4 ml HNO_3 65% - 1.4 ml H_2SO_4 95-97% Rozpuštění obou kyselin v ca. 500 ml dem. H_2O , přídavek patřičného množství NaCl a doplnění dem. H_2O do 1000ml.	Přídavek: 16.5 mg NaCl (=10 mg/l Cl)	Každý týden výměna zkušebního roztoku. Hodnota pH zkušebního roztoku se měří a zaznamenává před a po výměně.
K1.2			Přídavek: 1650 mg NaCl (=1000 mg/l Cl)	
K2.1	Mírný systém pH=3.5	Báze-organické kyseliny: - 44ml CH_3COOH 100% bezvodá - 49ml HCOOH 98-100% Rozpuštění obou kyselin v ca. 500ml dem. H_2O a doplnění dem. H_2O do 1000ml.	Přídavek: 16.5 mg NaCl (=10 mg/l Cl)	
K2.2			Přídavek: 1650 mg NaCl (=1000 mg/l Cl)	

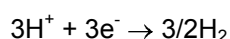
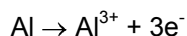
2.3 VYJÁDŘENÍ VÝSLEDKŮ

Korozní testy poskytují kvalitativní a kvantitativní výsledky, pomocí kterých se určí charakter korozního napadení, kterému daný materiál podléhá a mohou určit i odolnost vůči korozi za daných podmínek.

Kvalitativní výsledky jsou dány vizuálním pozorováním, ať už jde o pozorování okem či při zvětšení pod mikroskopem. Jedná se o celkový vzhled, rozsah napadení, typ koroze apod.

Z kvantitativních metod hodnocení lze využít některé z následujících stanovení:

- Objem uvolněného vodíku – metoda platná jen pro rovnoměrnou korozi. Jde o měření uvolněného vodíku během testu v činidle pro selektivní napadení. Tato reakce odpovídá anodickému rozpouštění hliníku:



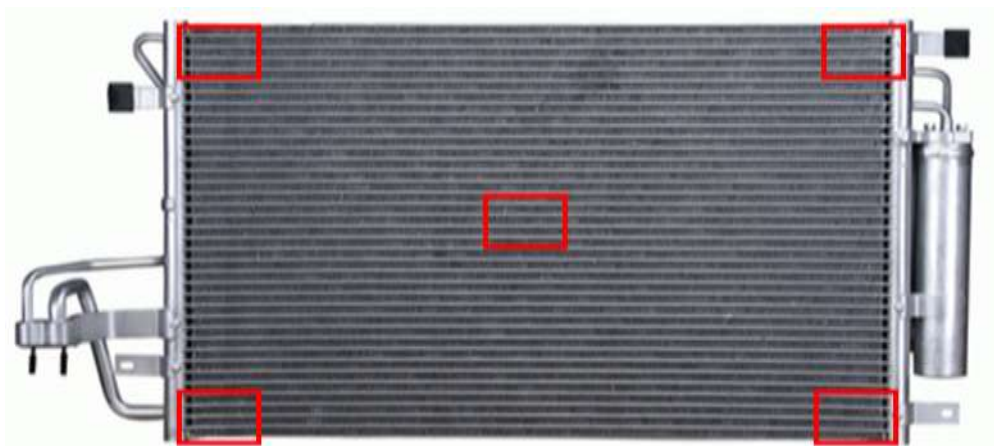
- Úbytky (přírůstky) materiálu – jde o hmotnostní změnu vztaženou na exponovanou plochu (např. $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) nebo o změnu tloušťky materiálů (např. mm). Stejně jako předchozí metoda i toto měření má význam jen pro rovnoměrnou korozi.

- Změna mechanických vlastností – mechanické vlastnosti se ověřují na obrobených zkušebních kusech referenčních vzorků a vzorků před a po expozici v korozním prostředí. Tato metoda dává správný údaj o intenzitě koroze zasahující do hloubky několika milimetrů (v případě významného zeslabení průřezu materiálu). Často nepravidelná povaha bodové koroze a lokalizace důlků na vzorku mohou ovlivnit výsledky hodnocení. V některých případech může být změna mechanických vlastností vlivem bodové koroze příliš malá na to, aby poskytovala významné výsledky. Tato metoda je vhodná v případech, kdy je důlková koroze převládajícím typem koroze a hustota důlků je relativně vysoká [57].
- Hloubka důlků – u lokálních forem napadení je hloubka důlků nejvýznamnějším ukazatelem, výsledky se pak vyhodnocují statistickými metodami [59][60].

2.3.1 METALOGRAFICKÉ HODNOCENÍ KOROZNÍHO NAPADENÍ

Metalografickým vyhodnocením se určuje druh koroze, tvar a rozmístění korozního napadení porovnáním vzorku s odpovídajícími etalony. Hloubka koroze je měřena na metalografickém výbrusu. Přípravu vzorků, zkoušení i samotný protokol z vyhodnocení korozního napadení definuje norma ČSN 03 8137. Ta nejprve definuje výběr vzorků a jejich množství a to tak, aby z hlediska matematické statistiky byl minimální počet vzorků statisticky významný. Plocha metalografického výbrusu pak musí být kolmá ke korodovanému povrchu, při odbírání vzorků nesmí být ovlivněna struktura, poškozena povrchová vrstva ani hrany vzorku a musí být odstraněny stopy po odběru. Aby se zabránilo nepřesnému vyhodnocení korozního napadení, nesmí dojít k ovlivnění korozního napadení při broušení a leštění metalografického výbrusu. Metalografický výbrus se vyhodnocuje před a po naleptání, aby se projevila případná souvislost mezi korozním napadením a strukturou. Vyhodnocení metalografické struktury se provádí pomocí světelného mikroskopu. Korozní napadení se vyhodnocuje po celé délce metalografického výbrusu. Přičemž na jednom vzorku může být zjištěno více druhů koroze [35]. Mezinárodní norma EN ISO 11463 poskytuje návod pro výběr postupů, které lze použít při zkoumání důlků a k hodnocení bodové koroze. Norma EN ISO 8993 stanovuje grafický vyhodnocovací systém založený na normalizovaných zobrazeních a norma EN ISO 8994 se pak zabývá systémem hodnocení bodové koroze grafickou respektive mřížkovou metodou. Obě normy poskytují prostředky definující úroveň provedení anodických oxidových povlaků na hliníku a jeho slitinách podrobených korozním zkouškám.

Uvedené metody ovšem k hodnocení koroze tepelných výměníků nejsou vhodné z důvodu malých ploch vystavených koroznímu působení. Proto se u hodnocení koroze tepelných výměníků přistupuje k následujícímu postupu: testované tepelné výměníky jsou během korozní zkoušky natlakovány a snímá se případný pokles tlaku. Doba tlakování a místo úniku se zaznamená a podle požadavku testu se test buď ukončí nebo se pokračuje až do konce požadované délky testování. Po ukončení testu se zkoušené kusy očistí podle normy ČSN ISO 8407, která stanovuje postupy odstraňování korozních zplodin vytvořených na vzorcích z kovů a slitin podrobených korozním zkouškám během expozice v agresivních prostředích [61]. Výběr vzorků podléhá požadavkům zákazníků, zpravidla se vybírají vzorky z okrajů a ze středu, jak je uvedeno na obrázku níže, viz *Obr. 2.3.1*. Vzorky se pak metalograficky připraví pro zkoumání pod mikroskopem, kde se hodnotí hloubka případně i četnost a druh korozního napadení vlnovců, trubek, bočnic/trubkovnic a pájených spojů.



Obr. 2.3.1 Výběr vzorků z tepelného výměníku pro metalografické vyhodnocení po korozní zkoušce.

2.4 MEZINÁRODNÍ KONFERENCE „ALUMINIUM BRAZING“

V Německu se pravidelně každý sudý rok koná konference „Aluminium Brazing“ týkající se pájení hliníku a problémů s tím spojených. Účast na této akci umožňuje sledovat trendy nejen v oblasti samotného pájení ať už plamenem nebo v ochranné atmosféře v peci, ale rovněž novinky v hliníkových materiálech. Protože se pájení v peci s ochrannou atmosférou či vakuem využívá při výrobě tepelných výměníků, jsou na této konferenci prezentovány studie společností zabývajících se jak výrobou samotných tepelných výměníků pro automobilový průmysl, tak i výrobou základních materiálů vhodných pro jejich montáž. Konferenci zajišťuje společnost DVS (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (German Welding Society)).

Na sedmém ročníku této mezinárodního konference konané v květnu 2012 byly představeny dvě na sobě nezávislé studie týkající se problematiky nízkotlakého systému EGR. Jedna byla provedena výrobcem hliníkových slitin společností Hydro a druhá výrobcem komponentů chladicích a klimatizační techniky společností Valeo. Týkaly se testování hliníkových vzorků pro tuto aplikaci. Obě společnosti používaly pro testování doporučení vycházející ze specifikace VDA 230-214, viz kap. 2.2, avšak průběh testů se lišil jak v délce testování, tak v použitých kondenzátech i testovaných materiálech.

Obě studie potvrzují aktuálnost této problematiky a naznačují směr řešení. Výsledky studií však byly zveřejněny až během kompletace dizertační práce, tudíž je bylo možno využít pouze pro verifikaci výsledků v jejím samotném závěru.

2.5 STATISTICKÉ METODY VYHODNOCENÍ KOROZE

Statistické metody ke zlepšení odhadu korozní rychlosti nebo k odhadu minimální zbytkové tloušťky materiálu byly navrženy již před více než 50 lety, ale obecně se používají spíše sporadicky. Statistické metody, v kombinaci s metodami spolehlivosti, poskytují možnost, jak získat hodnotnější analytické informace z naměřených dat a mohou poskytovat predikce ohledně budoucí pravděpodobnosti vzniku netěsnosti. Nicméně rozšířené statistické aplikace pro korozi nejsou běžné

především proto, že použití těchto metod vyžaduje odborné znalosti a žádné referenční normy neexistují. Pouze metodické pokyny, jak statistické metody využít v problematice korozního působení. Korozní působení prostředí na materiály může být různé, a proto se i statistické vyhodnocení jednotlivých druhů koroze liší. Statistická data vycházejí z měření tloušťky stěny součásti nebo z měření hloubky důlku (pokud je povrch přístupný). Na tato měření má vliv morfologie koroze a původní tvar povrchu čili drsnost.

Rešerše ukázala, že statistické metody pro analýzu korozních dat jsou sice k dispozici, avšak tyto metody nejsou široce používány pro svou náročnost a bohužel ani nejsou k dispozici ve zjednodušené formě. Přestože norma pro statistickou analýzu dat laboratorních testů koroze existuje, žádná takováto norma neexistuje pro analýzu kontrolních údajů týkajících se měření koroze. Aktuální data analytické metody pro kontrolu koroze vykazují některé nedostatky v jejich uplatňování. Statistická analýza může řešit některé z těchto nedostatků. Statistické metody mohou být také použity k odhadu celkové pravděpodobnosti lokálního porušení materiálu nebo spojů a následujících úniků chlazeného média v budoucnosti [36]. Pro důlkovou korozi lze použít statistické metody, ovšem je třeba brát v potaz, že vznik důlku na povrchu kovu závisí na mnoha faktorech, např. na náchylnosti kovu k bodové korozi, korozní agresivitě roztoku, ploše vzorku i době expozice. Pro stanovení náchylnosti kovů k bodové korozi je možno použít zkoušku pravděpodobnosti výskytu bodové koroze, ale ta neposkytuje informace o rychlosti šíření důlků, navíc jsou tyto výsledky použitelné jen pro podmínky dané zkoušky.

2.5.1 ANALÝZA ROZPTYLU

Statistické metody, které umožňují provádět vícenásobné porovnávání středních hodnot, jsou soustředěny pod souhrnným názvem analýza rozptylu (ANOVA – Analysis of Variance). Tato metoda je založena na hodnocení vztahů mezi rozptyly porovnávaných výběrových souborů (testování shody středních hodnot se převádí na testování shody dvou rozptylů (F-test)). Předpoklady pro platné použití metody analýzy rozptylu pro testování rozdílu více středních hodnot jsou:

- nezávislost měření (uvnitř skupin i mezi skupinami)
- normalita dat v každé skupině
- homogenita rozptylů uvnitř skupin (alespoň přibližná shoda rozptylů uvnitř skupin)

Základním úkolem analýzy rozptylu je posouzení hlavních a interakčních účinků jednotlivých faktorů na závisle proměnnou (proměnné) kvantitativního typu. Jedná se o zobecněnou analogii případu zjišťování rozdílu průměrů mezi dvěma nezávislými skupinami pomocí nepárového t-testu. V případě jednofaktorové analýzy rozptylu jde o zjišťování rozdílů průměrů mezi více skupinami (které reprezentují jednotlivé úrovně neboli kategorie sledovaného faktoru) prostřednictvím výpočtu testovacího kritéria F. Zjišťuje se, zda skupiny vytvořené klasifikačním faktorem jsou si podobné nebo zda jednotlivé průměry tvoří nějaké identifikovatelné shluky (homogenní podskupiny s podobnými hodnotami). Jestliže má působící faktor jenom dvě kategorie (úrovně), úloha je totožná s testováním rovnosti průměrů ve dvou nezávislých výběrech pomocí nepárového t-testu.

Základní statistikou počítanou v analýze rozptylu je obecně testovací kritérium F, pomocí něhož se testuje hypotéza, zda průměry ve skupinách určených působícím faktorem (příp. faktory) se od sebe liší více než na základě působení přirozené variability (náhodného kolísání). Počítaná testovací statistika F zohledňuje variabilitu výběrových průměrů a zároveň přirozenou variabilitu závislé náhodné proměnné.

Celkovou variabilitu (rozptyl) sledované proměnné lze rozdělit na 2 složky:

- rozptyl „uvnitř skupin“ (rozptyl mezi jedinci ve stejné skupině kolem skupinového průměru – ten je způsoben přirozenou variabilitou (způsobenou náhodnými vlivy)).
- rozptyl „mezi skupinami“ (tzn. rozptyl skupinových průměrů kolem společného, celkového průměru ze všech skupinových průměrů) – předpokládá se, že je způsoben jednak pokusným zásahem (působícím faktorem) a jednak opět přirozenou variabilitou.

Při porovnání obou rozptylů poměrem (pomocí F-testu) pak lze testovat nulovou hypotézu o shodě těchto rozptylů.

Pokud se zkoumá vliv dvou a více faktorů působících na závisle proměnnou, hovoří se o vícefaktorové analýze rozptylu. Při tomto postupu se rozlišuje mezi hlavními efekty a efekty, které jsou způsobeny interakcemi mezi faktory při působení na závisle proměnnou. Hlavní efekt je přímý efekt faktoru na závisle proměnnou. Interakční efekt představuje spojený efekt kombinace dvou nebo více faktorů na závisle proměnnou.

Nejjednodušším případem vícefaktorové analýzy rozptylu je analýza rozptylu dvojného třídění (two-way ANOVA), při níž se zkoumá vliv dvou faktorů na závisle proměnnou. Analýzou rozptylu dvojného třídění lze hodnotit tzv. blokové experimenty, při nichž se sleduje vliv určitého faktoru (označeného např. A), který se plánovitě mění, zatímco druhý faktor (označený jako B) se považuje za rušivý vliv. Při této analýze je snahou oddělit faktor B od vlivu faktoru A.

Interpretace výsledků analýzy rozptylu pro dvojné třídění závisí silně na přítomnosti interakcí mezi faktory. Interakce představují jediný podstatný problém při zobecnění postupu analýzy rozptylu jednoduchého třídění pro použití při hodnocení působení více faktorů. Konečná interpretace výsledků analýzy rozptylu dvojného (i vícenásobného) třídění pak spočívá ve vyhodnocení vlivu kombinací hlavních a interakčních efektů působících v experimentu [41].

2.5.2 NEPÁROVÝ T-TEST A F-TEST

Nepárový t-test porovnává data, tvořená dvěma nezávislými výběry (tzn. že pocházejí ze dvou různých skupin jedinců) z rozdělení $N(\mu_1, \sigma_1^2)$ a $N(\mu_2, \sigma_2^2)$ o rozsahu n_1 a n_2 s výběrovými rozptyly S_1^2 a S_2^2 . Testuje se nulová hypotéza: $H_0: \mu_1 = \mu_2$ (střední hodnota μ_1 1. výběru se rovná střední hodnotě μ_2 2. výběru). Výpočet testu vychází z odhadů parametrů obou srovnávaných populací, tj. aritmetického průměru a výběrového rozptylu obou výběrů:

U výběrových souborů se vypočítají výběrové charakteristiky:

1. výběrový soubor (počet členů n_1) : XXXXXXXXXX

2. výběrový soubor (počet členů n_2) : XXXXXXXXXX

Protože testované soubory mohou pocházet z populací, které mají stejný nebo naopak různý rozptyl hodnot sledované veličiny, je nejprve nutno otestovat rozdíl rozptylů obou souborů (nulovou hypotézu $H_0: S_1^2 = S_2^2$) pomocí F -testu:

$$F = \frac{\text{větší z rozptylů } (S_1^2)}{\text{menší z rozptylů } (S_2^2)}$$

Pro vyhledání tabulkové kritické hodnoty pro F -test je nutno stanovit stupně volnosti pro:

stupně volnosti čitatele (většího rozptylu): $n_v = n_{(1,2)} - 1$

stupně volnosti jmenovatele (menšího rozptylu): $n_m = n_{(1,2)} - 1$

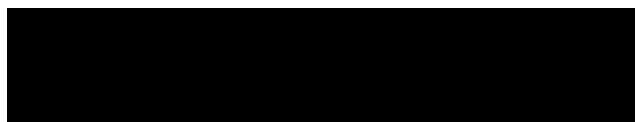
Ve statistických tabulkách se vyhledá kritická hodnota $F_{krit.} = 1 - \alpha/2$ kvantil F -rozdělení o (v_v, v_m) stupních volnosti pro zvolenou hladinu významnosti $\alpha = 0,05$.

F -testem se rozhoduje, zda pokusný zásah má vliv na proměnlivost (rozptyl S^2) zkoumané náhodné veličiny v populaci. Je důležitý i pro porovnání přesnosti dvou metod měření (např. srovnání přesnosti 2 přístrojů). V F -testu se testuje nulová hypotéza: $H_0: S_1^2 = S_2^2$. Výpočet F -testu vychází z dat dvou výběrových souborů, které jsou předmětem srovnávání. O každém z těchto souborů se předpokládá, že pochází z populace s Gaussovým normálním rozdělením s parametry μ a S^2 :

Výběrový soubor 1: (n_1 členů) vybrán ze základního souboru s parametry μ_1 a S_1^2

Výběrový soubor 2: (n_2 členů) vybrán ze základního souboru s parametry μ_2 a S_2^2

Nejprve se vypočítají výběrové rozptyly S_1^2 a S_2^2 :



Poté se stanoví počet stupňů volnosti u obou výběrů: $v_1 = n_1 - 1$ (pro S_1^2) a $v_2 = n_2 - 1$ (pro S_2^2) a vypočteme testovací kritérium (statistiku) F . Označí se v_v (počet stupňů volnosti většího z rozptylů) a v_m (počet stupňů volnosti menšího z rozptylů). Označení je důležité pro vyhledání kritické hodnoty ve statistických tabulkách. Dále se zvolí hladina významnosti a ve statistických tabulkách se vyhledá odpovídající kritická hodnota pro F -test:

$$F_{krit.} = 1 - \alpha/2 \text{ kvantil } F\text{-rozdělení o } (v_v, v_m) \text{ stupních volnosti}$$

Vypočtená statistika F se porovná s tabulkovou kritickou hodnotou:

Je-li $F > F_{krit.} \Rightarrow$ zamítá se nulová hypotéza $H_0: S_1^2 = S_2^2$.

Z toho plyne, že rozptyly obou souborů se statisticky významně liší (tj. výběry pocházejí ze dvou různých základních souborů s rozdílnými rozptyly s_1^2 a s_2^2). ($p < 0,05$ (přip. $p < 0,01$ podle zvolené hladiny významnosti α)).

Je-li $F < F_{krit.} \Rightarrow$ nelze zamítnout hypotézu H_0 .

Z toho plyne, že rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší (tj. výběry pochází ze stejného základního souboru se společným rozptylem s^2) ($p > 0,05$) [62].

N - rozdělení

μ - střední hodnota

■ - výběrový průměr

S^2 - výběrový rozptyl

F - testovací kritérium

H_0 - nulová hypotéza

n - rozsah souboru (počet členů)

p – hladina významnosti

2.5.3 METODIKA DOE

Technika DOE (Design of Experiment), která využívá přístupu japonského odborníka Dr. Taguchiho, je velmi efektivním nástrojem pro zlepšování jakosti produktu a redukci nákladů. Nejvhodnější oblast pro použití této techniky je právě výzkum a vývoj a dále pak testování a validace. Tato technika je v poslední době velmi využívána například i předními výrobci automobilů, jako je Ford, GM a VW. DOE umožňuje řešení složitých a komplexních úloh, kdy je konečný výsledek ovlivňován velkým počtem faktorů. Proto je nutné provést rozsáhlou analýzu pomocí nástroje, který je schopen ji pojmout celou. Cílem je nalézt kritické faktory, jejich optimalizaci, minimalizaci variability a v závěru vytvořit tzv. robustní model, v němž jsou charakteristiky odolné vůči působení vnějších přirozených vlivů. Nejedná se však jen o čistě statistické metody, ale o provázání analytických technik se statistickými. Z hlediska předvývojových etap mohou být pomocí technik DOE zkoumány konstrukční a výrobní technické alternativy řešení s ohledem na jejich vzájemnou interakci a ovlivňování. Hlavním důvodem je predikce chování systému v budoucnosti a odhalení možností jeho zlepšení. Aplikací DOE v této fázi můžeme předcházet kvalitativním problémům při konečné výrobě, a tak opět snižovat náklady. Metodika může být samozřejmě použita v každé fázi plánování a přípravy vývoje produktu, procesu a vlastní sériové produkce. Metodika DOE patří k nástrojům, které vyžadují skutečně precizní přípravu před samotnou realizací experimentu. Nejprve je nutné úlohu analyzovat, stanovit si přesně zadání a připravit základní vstupy pro samotné plánování experimentů. Čas vložený do přípravy je však snadno získán zpět, protože se díky této přípravě provádí jen skutečně nezbytný experiment [42]. V této práci byla metodika DOE využívána při výběru materiálů a jejich kombinací.

3 CÍLE A OBSAH DISERTAČNÍ PRÁCE

Snížení emisí spalovacích motorů je možno dosáhnout mimo jiné pomocí maximálního využití recirkulovaných spalin. V této souvislosti bylo nutno vyřešit několik následujících problémů týkajících se tzv. interní koroze chladičů plnicího vzduchu, k níž dochází v důsledku kondenzujících spalin na vnitřním povrchu. První z cílů této disertační práce bylo zejména definování chemických látek, které vznikají při průchodu spalin v chladiči plnicího vzduchu. Dále bylo nutno definovat testovací procedury a experimentálně ověřit jejich provedení. Na základě výsledků testů pak byly určeny materiály s optimální odolností vůči tomuto silně koroznímu prostředí. Pro praktické použití bylo nutno rovněž definovat procedury pro sériové testování interní koroze. Sériovým testováním se rozumí ověřování předepsaných vlastností finálních výrobků před i během výroby. Testy se mohou drobně lišit podle požadavků zakazníků.

Pro přehlednost jsou cíle disertační práce uvedeny v následujících bodech:

- Specifikace chemického složení kondenzátů působících na chladič plnicího vzduchu při průchodu spalin.
- Návrh testovacích procedur a jejich následné provedení.
- Určení materiálů vyhovujících použití v praxi na základě provedených testů.
- Definování testovacích procedur pro sériové testování.

4 CHEMICKÉ SLOŽENÍ KONDENZÁTŮ SPALIN

S vývojem aplikace nízkotlaké recirkulace spalin roste význam specifikace složení kondenzujících par výfukových spalin. Aby bylo možné začít se studiem koroze v této aplikaci, bylo nutné zjistit chemické složení spalin a elektrolytů vznikajících jejich kondenzací při ochlazování. Složení spalin a kondenzátů závisí nejen na typu paliva a typu motoru, ale rovněž i na fázi motoru a provozním režimu (částečné zatížení, vysoký výkon při plném zatížení). Protože je měření koncentrace plynů ve spalinách poměrně složité, docházelo k tomu, že modelové kondenzáty navržené výrobcí automobilů se významně lišily svým složením a potažmo i hodnotami pH. Během celého období testování docházelo k úpravám ve složení kondenzátu ze stran jednotlivých výrobců. Všechny navržené varianty chemického složení jsou uvedeny v tabulce, viz *Tab. 2.5.1*.

Tab. 2.5.1 Kondenzáty navržené dodavateli automobilů.

Č. kondenzátu	1	2	3	4					
Původce	B	A	E	F(2010)	F(2012)	A2	C	D	A1
pH	2,5	4,5	2	3	2,5	3,1	2,5	2,5	2,7
HNO ₃ [mg/l]	100	15,7	37	130	52	8	200	80,9	60
NO ₂ [mg/l]		29,1	21						-
H ₂ SO ₄ [mg/l]	320	77,3	4	1340	320	70	400	26,3	56
HCOOH [mg/l]	3000	-	-	99	3167	20	500	-	70
C ₂ H ₅ COOH [mg/l]	600	-	-	-	474	-	-	-	-
CH ₃ COOH [mg/l]	700	-	-	897	590	40	500	-	65
HCl [mg/l]	50	73,3	1	21	-	2	20	22,6	50
HF [mg/l]	-	-	-	-	-	50	-	69	-
CH ₂ O [mg/l]		-	-	171					-
C ₃ H ₆ O ₃ [mg/l]	-	-	-	-	-	-	500	-	-
NH ₄ ⁺ [mg/l]	-	7,9	-	-	-	40	-	-	-
NaNO ₂ [mg/l]	-	-	-	207	-	-	-	-	-
Na ₂ SO ₃ [mg/l]	-	-	-	139	-	-	-	-	-
Množství pevné síry [ppm]	-	-	-	-	-	-	-	-	15

Spalování je oxidační proces, kdy dochází k reakcím mezi hořlavými složkami paliva a kyslíkem, který se do procesu dostává ve formě přisávaného vzduchu s obsahem 21 obj.% kyslíku. K chodu motoru je nutný daný poměr vzduchu a paliva. Ideálně platí, že na 1 kg nafty je potřeba 14,5 kg vzduchu (pro benzín 14,7 kg vzduchu), z toho plyne, že ke spálení 1 litru paliva je nutno 10.000 l vzduchu, jde o ideální směšovací poměr. Pro popsání jednotlivých režimů motoru byl zaveden součinitel přebytku vzduchu λ (lambda). Pro ideální poměr platí $\lambda=1$, což je prakticky možné jen při ustáleném režimu práce motoru, kdy se hodnoty λ pohybují kolem jedné. Při částečném zatížení motoru platí $\lambda>1$, jedná se tedy o chudé směsi a naopak pro vysoký výkon při $\lambda < 1$ o směsi bohaté [43].

Výfukové plyny obsahují již dříve zmíněné látky (viz kap. 1.2) vznikající při spalování paliva. I za přebytku kyslíku mohou heterogenní podmínky spalovací komory způsobit neúplné oxidační reakce, tedy nespálení nebo jen částečnou oxidaci nejen CO ale i uhlovodíků ve výfukových plynech. Některé z těchto látek jsou zodpovědné za typický zápach výfukových plynů vznětového motoru. Všechny motory zlepšující parametry využití kyslíku ve spalovací komoře (jako vířící směs) a rovněž vyšší teploty spalování mohou snížit emise CO a uhlovodíků.

Místní bohaté podmínky během spalování vedou k tvorbě grafitu (saze) přes mezistupně acetylů a polycyklických uhlovodíků. Koagulačními a aglomeračními procesy vznikají částice sazí o velikosti cca 100-300 nm v průměru z původní velikosti primárních částic přibližně 1-10 nm. Velká plocha těchto částic (až 200 m²/g) je činí silně adsorbentními, proto se ve výfukových sazích dieselových motorů může projevit velký podíl (více než 50% hm.) uhlíku, uhlovodíků, sulfátů, vody a složky mazacích olejů. V oxidačních reakcích za přítomnosti dusíku dochází ke vzniku oxidů dusíku (NO a NO₂). Vzhledem k tomu, že koncentrace obou složek a jejich poměr závisí na reakční teplotě a na koncentraci kyslíku při spalování, mohou být emise NO_x sníženy vhodnými úpravami motoru, jako je pozdní vstřikování paliva (pokles teploty plynu) a výfuková recirkulace spalin (pokles koncentrace kyslíku). Spalováním paliv obsahujících síru primárně vzniká SO₂, který je dále oxidován při teplotě vyšší než 300°C a tvoří SO₃, který prudce reaguje s vodou za vzniku kyseliny sírové (H₂SO₄).

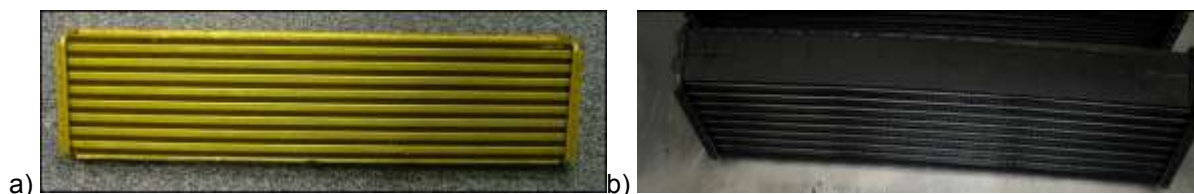
Měření výfukových spalin se víceméně shodovalo v přítomnosti následujících látek: oxidy dusíku, sírany a kyseliny chlorovodíková, mravenčí a octová, což jsou hlavní složky navržených kondenzátů, viz kap. 4. Jak se i dále testováním ověřilo, přítomnost chloridů a síranů spolu s nízkými hodnotami pH má na korozi hliníkových slitin největší vliv, viz kap. 6.4.4.

5 VÝBĚR MATERIÁLŮ PRO LP EGR APLIKACI

Výběr materiálů pro testování odolnosti vůči interní korozi byl intenzivně konzultován jak s výrobcí automobilů, tak s dodavateli hliníkových komponentů. Zásadní bylo uvážení mnohem agresivnějšího korozního prostředí v dané aplikaci oproti stávajícím systémům. Z důvodů popsaných v kap.1.6 nemohly být použity materiály, jako jsou slitiny EN AW-3003 nebo EN AW-3103, které podle předchozích testů v kyselých prostředích s hodnotou pH kolem 3 korodují mezikrystalově skrz celou tloušťku. Byly vybrány materiály, popsané v následujících kapitolách, pro zkoušení odolnosti vůči interní korozi pro použití v systémech LP EGR.

5.1 POVLAKOVANÉ MATERIÁLY

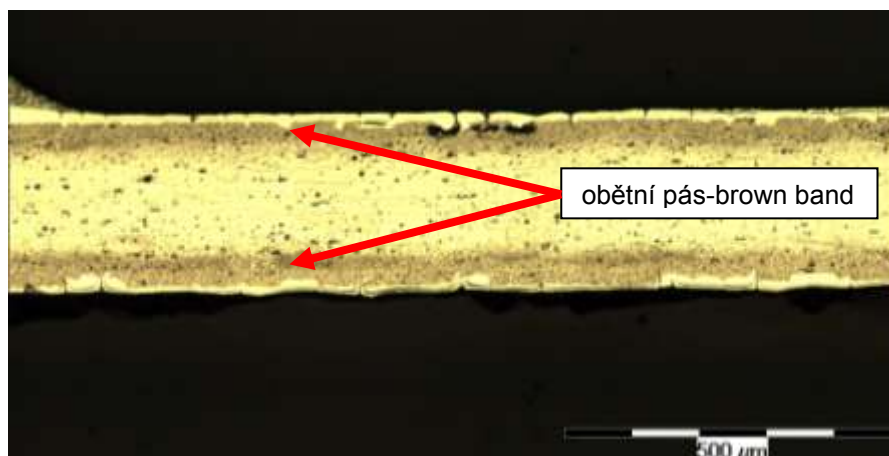
Metoda povlakování se využívá u tepelných výměníků umístěných za maskou automobilu zejména z vizuálních (designových) důvodů. Aby chladič za maskou neprosvítal, užívá se černý povlak, který má kromě své „vizuální“ funkce také funkci účelovou, a to zvýšit ochranu vůči korozi. Z pozitivních zkušeností povlakovaných výměníků v oblasti externí koroze se pak vycházelo i pro testování odolnosti vůči interní korozi. V nabídce byly povlaky dva – první z nich byl dvouvrstvý epoxy-fenolový povlak tzv. EPE, o tloušťce 10 μm a s maximální korozní odolností při teplotách do 250°C, barva zlatá. Jeho výhoda spočívá v dobré chemické odolnosti a adhezních vlastnostech, ovšem nevýhodou je částečné snížení tepelné vodivosti. Tento povlak se používá celosvětově v leteckém a v Japonsku i v automobilovém průmyslu. Druhý povlak byl na siloxanové bázi, tzv. SPPC (Siloxane based polymer pre-ceramic coating), s tloušťkou do 20 μm , s odolností do 300°C, barva černá. Viz Obr. 5.1.1



Obr. 5.1.1 a) EPE povlak, b) SPPC povlak.

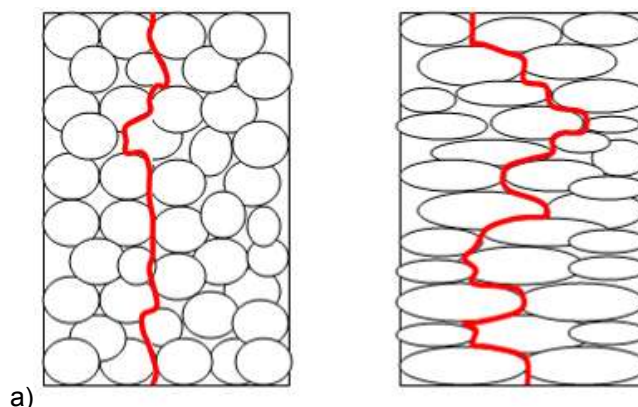
5.2 SLITINY LLA

Long Life Alloys (dále jen LLA) jsou slitiny hliníku, které se vyznačují vysokou pevností po pájení a výbornou odolností vůči korozi. Ve srovnání s běžnými slitinami je životnost těchto slitin až pětikrát delší při korozní zkoušce zvané SWAAT (sea water acetic acid test), což je korozní zkouška v okyselené solné mlze. Tento test je popsán podrobněji v kap. 2.1. LLA vykazují lepší korozní odolnost díky difúzi křemíku z plátování do základního materiálu, kdy v difúzní zóně precipitují malé částice AlMnFeSi podél rozhraní plátovacího a základního materiálu v tloušťce 20-50 μm . Tento pás, označovaný jako „brown band“, vykazuje nižší korozní odolnost než střed základního materiálu, vytváří tedy pás obětované anody k ochraně základního materiálu vůči korozi [48]. Na obrázku níže, viz Obr. 5.2.1, je viditelný průběh koroze, která probíhá laterálně po vrstvě.



Obr. 5.2.1 Vzorek slitiny typu LLA po korozi, hnědé pásy pod povrchem jsou vrstvami obohacenými o křemík a ochuzenými o mangan a měď s nižší korozní odolností proti středu.

Dalším mechanismem způsobujícím zvýšení korozní odolnosti je tvorba oblasti ochuzené o měď na povrchu pájeného materiálu. Relativně vysoký přídavek mědi v základním materiálu vytváří silnou o měď ochuzenou vrstvu na povrchu pájeného materiálu vlivem difúze mědi ze základního materiálu s vysokým obsahem mědi do rozpuštěného plátovacího materiálu s nízkým obsahem mědi. Tato ochuzená vrstva je proti základnímu materiálu méně ušlechtilá (anodická). To je případ hodnocené slitiny PR3916. Navíc při termomechanickém procesu zpracování k dosažení stavu H24 je předpoklad tvorby prodloužených zrn v základním materiálu během pájecího procesu. Vzhledem k tomu, že hranice zrn jsou velice náchylné na korozi (korozi přednostně podléhají hranice zrn), jsou pro LLA výhodou vhodně orientovaná zrna oproti malým kulatým zrnům [49][50]. Viz Obr. 5.2.2 znázorňující průběh koroze po hranicích zrn kulatých respektive zrn s výhodnou orientací.



Obr. 5.2.2 Průběh koroze po hranicích a) kulatých zrn a b) zrn s výhodnou orientací.

5.3 MULTICLAD MATERIÁLY

Vícevrstvé materiály jsou, jak už název napovídá, materiály složené z více materiálů, a to proto, aby bylo dosaženo větší odolnosti vůči korozi. Mechanismus ochrany základního materiálu spočívá buď v obětování „navíc“ vložené mezi-vrstvy s nižším korozním potenciálem oproti základnímu materiálu (to tedy znamená, že koroze bude přednostně probíhat v této vrstvě a její průběh bude laterální) nebo v ochraně základního materiálu materiálem ušlechtilejším tak, aby se

korozí k základnímu materiálu nedostala. Složení a výroba vícevrstvého materiálu jsou definovány v patentu [44].

Výroba vícevrstvého materiálu probíhá následovně: nejprve je odlit ingot s vrstvami slitin hliníku anebo je vyroben válcovaný vícevrstvý výrobek mající čtyř nebo pětivrstevný pájecí plech. Jednotlivé kroky výroby spočívají nejprve v odlití základního materiálu o definovaném složení, následuje homogenizace a/nebo předehřev při teplotě 490 až 610°C a s dobou ohřevu 1 až 24 hodin. Pak se základní materiál „naplátuje“ z jedné strany pájkou typu Al-Si o tloušťce 3 až 20% tloušťky stěny základního materiálu a z druhé strany vrstvou slitiny hliníku jednoho z typů AA3xxx, AA7xxx nebo AA1xxx o tloušťce 5 až 30% tloušťky stěny základního materiálu. Následuje ohřev na teplotu (400- 490)°C po dobu 1 až 20 hodin, válcování za tepla nebo za studena na první tloušťku a rekrytizační žíhání v rozmezí teplot (250-450)°C po dobu 10 hodin. Pokračuje se válcováním za studena na druhou tloušťku s deformací (10 až 40)%. Posledním krokem je závěrečné žíhání při teplotách od 250 do 420°C po dobu 1 až 10 hodin a to tak, aby konečný produkt nebyl rekrytalizován a průměrná velikost zrna získaná při předcházejícím rekrytalizačním žíhání se udržovala okolo 60 μm.

Matrice je tvořena požadovanou slitinou hliníku, zpravidla typu Al-Mn, ta je z každé strany obklopena mezivrstvou AA3xxx, AA7xxx nebo AA1xxx a alespoň na jednom povrchu je pak naválcován pájecí materiál slitiny typu Al-Si, viz Obr. 5.3.1. Uvedená mezivrstva odlišného složení je tvořena buď anodickým materiálem, tedy méně korozně odolným oproti základnímu materiálu, anebo katodickým materiálem, ušlechtlejším oproti základnímu materiálu. Zmíněné mezivrstvy mají složení odpovídající již zmíněným slitinám skupiny AA7xxx, AA3003 nebo čistému hliníku typu AA1xxx.

Tento typ materiálu představuje nejnovější trendy v oblasti hliníkových slitin používaných v automobilovém průmyslu.



Obr. 5.3.1 Zobrazení jednotlivých vrstev vícevrstvého materiálu.

6 TESTOVACÍ PROCEDURY

Testovací procedury slouží k ověření reálné životnosti jednotlivých komponentů během provozu automobilu. Nejlépe vypovídající testy ověření životnosti jsou prováděny přímo při provozu automobilu, ovšem vzhledem k jejich finanční a časové náročnosti je jejich použití pro vývojové účely velmi omezené. Automobily jsou však tímto způsobem testovány v předvýrobní fázi a získaná experimentální data je možno přenést do zkrácených životnostních testů, což je běžná praxe. Avšak i zkrácené životnostní testy prováděné na systémových zařízeních v laboratořích jsou finančně i časově náročné.

Úkolem v prvotní fázi bylo stanovit takový přístup k testování, který by neznamenal větší finanční zátěž a zároveň by dostatečně rychle podal úvodní, relevantní výsledky ohledně odolnosti materiálů vůči interní korozi, tj. korozi na vnitřním povrchu chladiče ve vznikajících kondenzátech spalín.

Na základě těchto požadavků byl navržen 1. statický korozní test, podle jeho výsledků měly být vybrány materiály pro stavbu chladičů stlačeného vzduchu, které se měly ověřit v testu dynamickém.

Dynamický test byl navržen tak, aby již simuloval jízdní podmínky, tudíž vzorky pro testování jsou kompaktní tepelné výměníky. Naopak vzorky pro statický test měly simulovat pouze materiály chladičů plnicího vzduchu, které jsou vystavené koroznímu působení vznikajících kondenzátů spalín na vnitřním povrchu. Konkrétně se jedná o vnitřní povrch trubek a vnitřní vlnovce, proto byly vzorky postaveny pouze z trubek s napájecími vnitřními vlnovci.

Statický test II byl obměnou původního statického testu I, vzorky byly rovněž vyrobeny z materiálů pro trubky a vlnovce, ovšem s tím rozdílem, že se vlnovce připájely mezi pláty a byly jednotlivě ponořeny do zkušebních kondenzátů.

Posledním statickým testem, označovaným jako statický test III, byl test se střídajícími se cykly ponoru a sušení, kdy vzorky stejně jako v předchozím testu byly vyrobeny z plátů a připájených vlnovců. Použité kondenzáty v jednotlivých testech vycházely z požadavků zákazníků a našich návrhů.

Kritériem pro vyhodnocení vzorků byly dvě podmínky, a sice že korozní napadení nesmí přesáhnout 30% původní tloušťky materiálu, což je obecně daný požadavek získaný na základě empirických zkušeností, a mezikrystalový typ koroze, který je pro svůj nepředvídatelný průběh nepřijatelný.

V následujících kapitolách není dodržena časová osa testování. Důvodem je lepší přehlednost a orientace v textu. Reálně byl nejprve proveden statický test I, následovalo ověření materiálů v dynamickém testu I a v dynamickém testu II, pro nevyhovující výsledky druhého dynamického testu byla stanovena levnější varianta testování tzv. statický test II a konečně i statický test III. Provedené testy jsou v textu seřazeny podle metodiky testování následujícím způsobem:

- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1. Dynamický test I | 4. Statický test II |
| 2. Dynamický test II | 5. Statický test III |
| 3. Statický test I | |

6.1 DYNAMICKÝ TEST I

Úkolem provedení námi navrženého dynamického testu bylo ověření korozní odolnosti materiálů v rámci celého tepelného výměníku, šlo tedy o simulaci provozních podmínek. Cílem testu bylo ověřit vhodnost použití navržených materiálů vyhodnocených na základě statického testu I, kdy se předpokládalo, že korozní napadení materiálů vystavených testovacímu médiu bude vyhovovat definovaným kritériím vyhodnocení. Cílem testu rovněž bylo posouzení metodiky testu pro sériové testování.

Dynamický test k ověření interní koroze byl proveden v laboratorních podmínkách společnosti Visteon, kdy na základě požadavků zadavatelů byl použit test s dobou expozice 4000 cyklů (což přibližně odpovídá 6 týdnům).

PRŮBĚH TESTU:

Jeden zkušební cyklus sestával:

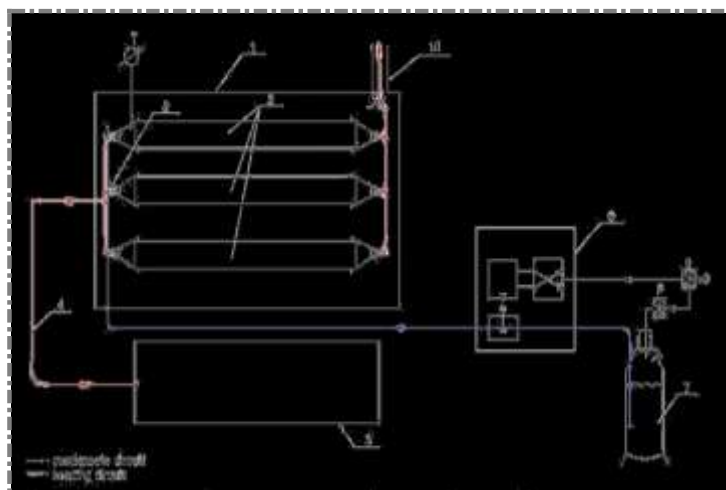
- a) z jízdní fáze (68 hod/týden) – 15 sekund smáčení vnitřního povrchu (napouštění kondenzátem) a 15 minut sušení vzduchem o teplotě 180°C
- b) z fáze volnoběhu (100 hod/týden) se stejnou dobou smáčení a sušení, lišila se pouze v teplotě sušícího vzduchu, ta byla pokojová (25°C).

V tomto testu byl použit kondenzát č.2 podle specifikace původce A, jeho složení je uvedeno v tabulce, viz Tab. 6.1.1.

Tab. 6.1.1 Složení kondenzátu č.2 podle zákaznické specifikace původce A.

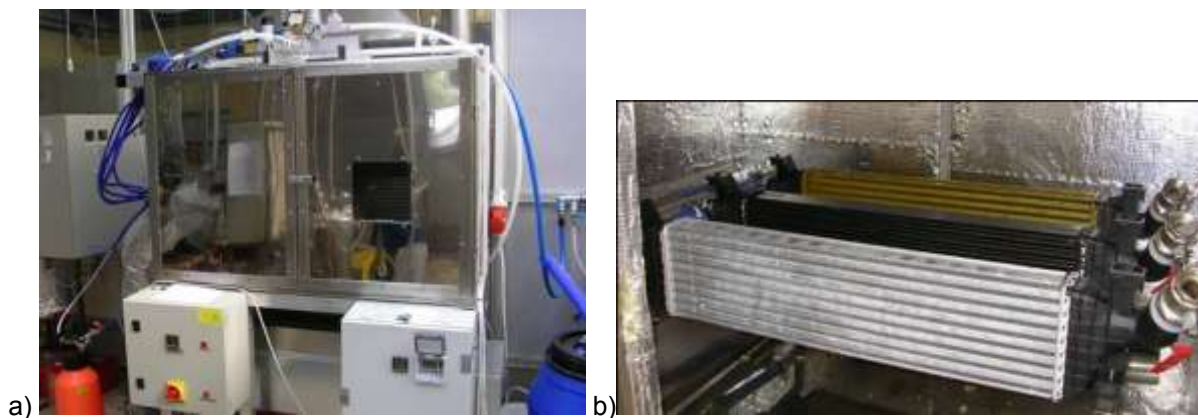
kondenzát	pH	HNO ₃ [mg/l]	H ₂ SO ₄ [mg/l]	HCl [mg/l]
č.2	4,5	44,8	77,3	73,3

Schéma testovacího zařízení a samotné testovací zařízení, navržené konkrétně pro tento test, s umístěním vzorků jsou vyobrazeny níže, viz Obr. 6.1.1 a Obr. 6.1.2.



- 1) Testovací komora
 - 2) Chladič plyního vzduchu
 - 3) Elektrický ohřev vzduchu
 - 4) Vedení horkého vzduchu
 - 5) Trysky kondenzátu
 - 6) Kontrolní systém dávkování kondenzátu
 - 7) Tlaková nádrž s kondenzátem
 - 8) Kontrolní ventil
 - 9) Stlačený vzduch
 - 10) Kontrolní systém dávkování
- T – měřič teploty
P – měřič tlaku

Obr. 6.1.1 Schéma testovacího zařízení navrženého pro dynamický test.



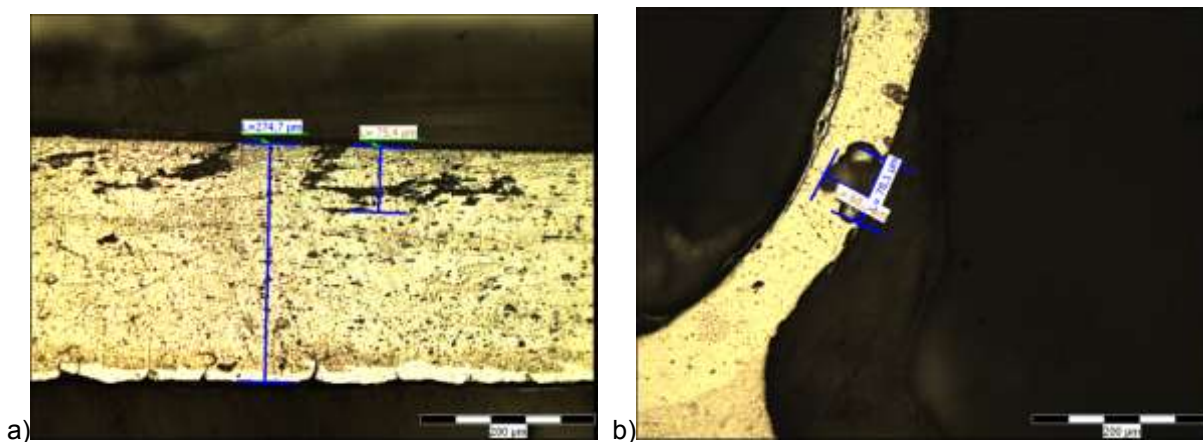
Obr. 6.1.2 a) Testovací zařízení, b) umístění vzorků v testovacím zařízení. Vzorek bez povlaku, vzorek s SPPC (černý), EPE (zlatý).

Byly testovány 3 vzorky mezichladičů, jeden ze sériové výroby zhotovený z běžných materiálů typu EN AW-3003 a EN AW-3017 bez povlaku, další dva ze stejných materiálů ovšem s povlaky SPPC a EPE testovaných ve statickém testu I., viz kap. 6.1. Povlak EPE je dvouvrstvý epoxy-fenolový, o tloušťce 10 μm a s maximální korozní odolností při teplotách do 250°C, barva zlatá. Černý povlak tzv. SPPC (Siloxane based polymer pre-ceramic coating) je na siloxanové bázi, s tloušťkou do 20 μm , s odolností do 300°C, viz kap. 5.1, povlak byl nanesen i na vnitřní straně trubek.

VYHODNOCENÍ:

Po skončení testu byly vzorky natlakovány vzduchem o 150 kPa a při ponoru ve vodě drženy po dobu 20 s, aby se zjistila případná netěsnost, což je standardní ověření těsnosti vzorků tepelných výměníků po korozním testu. Výskyt netěsností nebyl prokázán.

Následovalo metalografické hodnocení všech vzorků se zjištěním mezikrystalového napadení vzorku bez povlaku, které přesahovalo hloubku 30% tloušťky stěny plátů a u vlnovců v některých místech s průnikem skrz celou tloušťku, viz Obr. 6.1.3 a Obr. 6.1.4. Výrazné korozní napadení bylo způsobeno vysokým obsahem kyseliny chlorovodíkové a sírové v kondenzátu, viz Tab. 6.1.1.



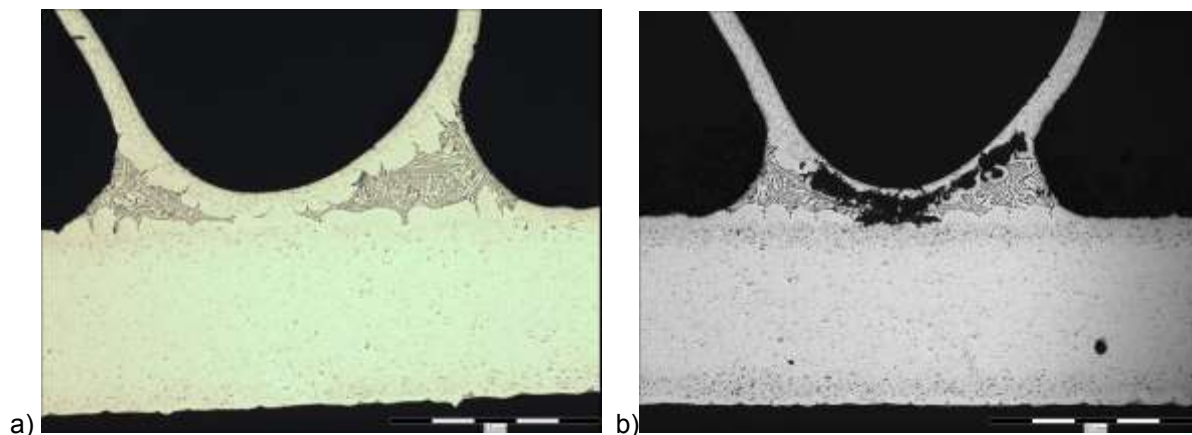
Obr. 6.1.3 Korozní napadení vzorků bez povlaku po dynamickém testu, a) trubka s mezikrystalovou korozí, b) vlnovec.

Vzorek bez povlaku byl označen jako nevyhovující, protože korozní napadení větší než 30% tloušťky materiálu a mezikrystalová koroze jsou nežádoucí. Naproti tomu povlakované materiály

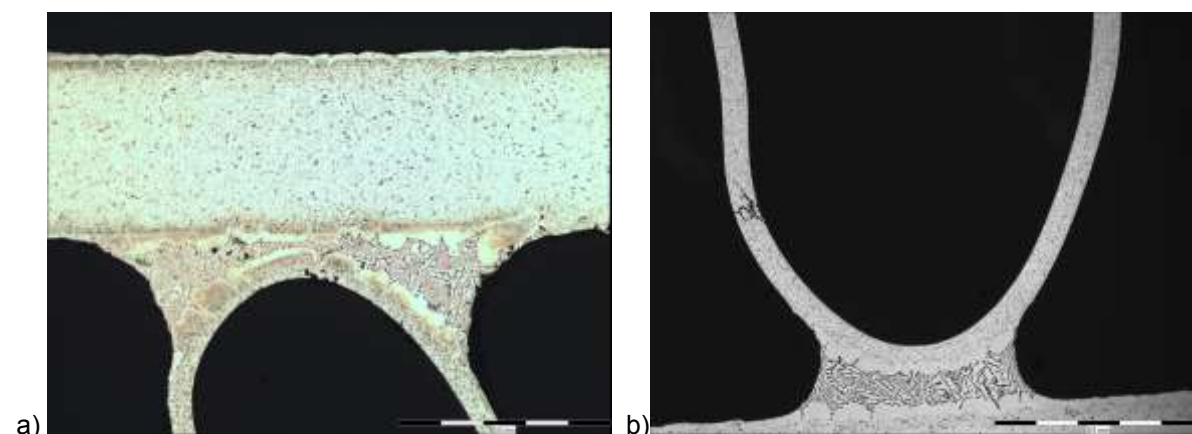
odolaly koroznímu napadení, aniž by došlo k porušení exponovaného povrchu trubek. Vlnovce i pájené spoje byly napadeny korozí.

SHRNUTÍ:

I přes korozi vlnovců a pájených spojů nedošlo k jejich separaci, tudíž funkce chladiče stlačeného vzduchu zůstává zachována, i když vlivem koroze vlnovců může být snížena, viz *Obr. 6.1.4 a Obr. 6.1.5*.



Obr. 6.1.4 Mikroskopické snímky vzorků s povlakem SPPC po dynamickém testu, a) trubka bez napadení, b) koroze vlnovce a pájeného spoje.



Obr. 6.1.5 Mikroskopické snímky vzorků s povlakem EPE po dynamickém testu, a) trubka bez napadení, b) mezikrystalová koroze vlnovce.

Ovšem s ohledem na vysokou cenu povlakování a technologickou náročnost bylo rozhodnuto nalézt cenově dostupnější materiály, které by byly i bez povlaku schopny odolat koroznímu působení zkušebních roztoků.

Testovací procedura simulovala provozní podmínky automobilu, ale pro svou finanční náročnost byla určena k ověřování materiálů vývojových projektů a stanovena jako nevhodná k sériovému testování.

6.2 DYNAMICKÝ TEST II

Provedení dynamického testu II bylo motivováno jednak ověřením nového kondenzátu a jednak nalezením takového materiálu, který by vyhověl podmínkám testu jako povlakované materiály, ale byl by cenově dostupnější. Vzhledem k nově nabytým znalostem z dynamického testu I byla upravena i metodika samotného testování. Rovněž byl použit jiný kondenzát (č.1 původce B) s nižší hodnotou pH než kondenzát č.2 původce A použitý při prvním dynamickém testu. A to proto, že analýzou kondenzátu v chladiči stlačeného vzduchu z provozu automobilu bylo zjištěno, že hodnoty pH se pohybují v rozmezí 2,5 - 3. Z výše zmíněné finanční náročnosti povlakovaných materiálů byly vybrány k otestování slitiny LLA (long life alloys) s větší odolností vůči korozi, viz kap.5.2. Šlo o materiály trubek společností Alcoa 0333 a Sapa 7857 Trillium a materiál vlnovce standardní EN AW-3003, jejichž složení je uvedeno níže, viz *Tab. 6.2.1*.

Tab. 6.2.1 Složení materiálů trubek a vlnovců pro dynamický test II.

Materiál	Složení (% hm.)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Ostatní
Sapa FA 7857	0.5	0.5	0.25-0.5	1.0-2.0	0.03	-	0.1	0.08-0.25	-	-
Alcoa 0333	0.25	0.6	0.2-0.4	0.8-1.3	0.02-0.1	-	0.25	-	-	-
EN AW-3003	0.6	0.7	0.05-0.2	1-1.5	-	-	0.1			-

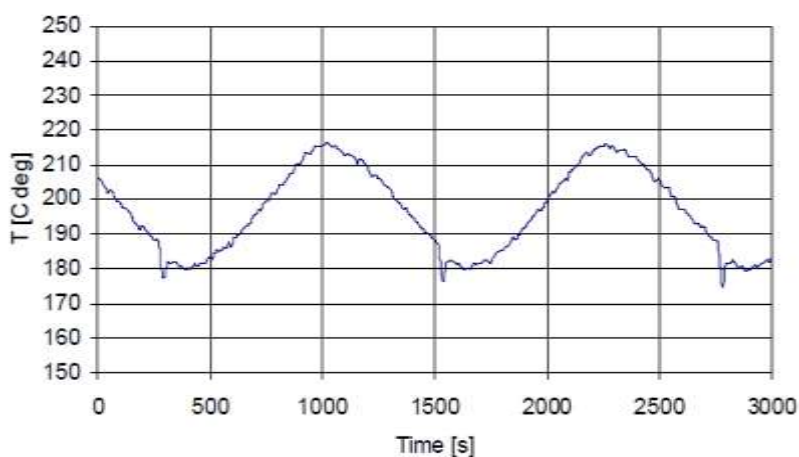
PRŮBĚH TESTU:

Test byl proveden v laboratoři Bosmal Automotive Research and Development Institute Ltd. V Bielsko-Biala v Polsku na přelomu let 2011 a 2012. Jde o laboratoř, která se specializuje, jak už sám název napovídá, na testování pro automobilový průmysl. Dynamický test byl proveden v testovacím zařízení, viz *Obr. 6.2.1*, za následujících námi definovaných podmínek:

- trvání 6,8 týdnů (4000 cyklů)
- jízdní fáze (79 hod/týden): 15 s smáčení, 20 min sušení, teplota vzduchu: 180→215→180°C (*Obr. 6.2.2*)
- klidová fáze (89 hod/týden): 15 s smáčení, 15 min sušení při 25°C ± 4°C
- testovací médium: směs čistého vzduchu a kondenzátu 1:1
- průtok vzduchu během vstřikování (jízdní/klidová fáze): 25.2 kg/hod
- průtok kondenzátu během vstřikování (jízdní/klidová fáze): 8.4 l/hod na 1 vzorek
- složení roztoku – kondenzát č.1 původce B, viz *Tab. 6.2.2*.



Obr. 6.2.1 Umístění vzorků v testovací komoře, testovací zařízení.



Obr. 6.2.2 Graf průběhu teplot v jízdě fázi testu.

Tab. 6.2.2 Složení kondenzátu č.1 podle specifikace původce B.

Kondenzát	pH	HNO ₃ [mg/l]	H ₂ SO ₄ [mg/l]	HCl [mg/l]	HF [mg/l]
č.1	2,5	80,9	26,3	22,6	69

VYHODNOCENÍ:

Netěsnost vzorků se opět ověřovala jejich natlakováním (150 kPa) a následným ponořením do vody po dobu 20 s. Únik vzorků nebyl zaznamenán. Poté byly vzorky rozřezány a připraveny pro metalografické zkoumání. Oblast zaplavení komory kondenzátem je zřejmá díky výskytu korozních produktů na vnitřním povrchu komory, viz Obr. 6.2.3.



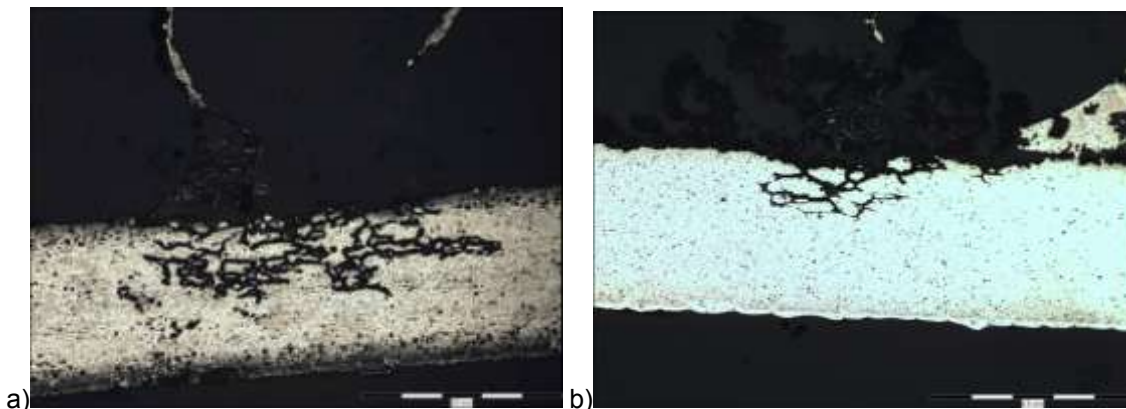
Obr. 6.2.3 Vnitřní povrch komory po dynamickém testu.

Vzorky pro metalografické vyhodnocení byly vybrány v oblastech znázorněných na Obr. 6.2.4.



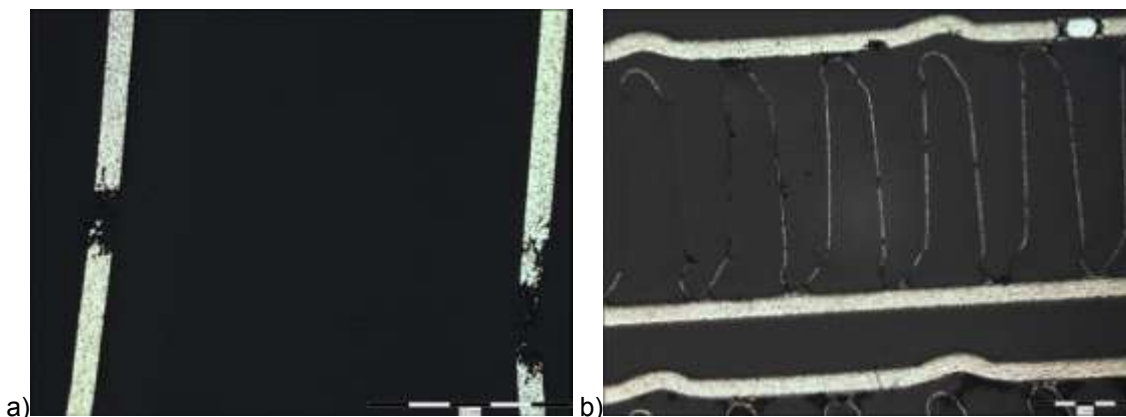
Obr. 6.2.4 Označení oblastí výběru vzorků pro metalografii.

Pod vrstvou korozních produktů bylo zjištěno lokální mezikrystalové napadení materiálu zasahující do hloubky 50% tloušťky stěny trubky, viz Obr. 6.2.5.



Obr. 6.2.5 Mezikrystalová koroze na trubkách obou testovaných materiálů a) FA7857 a b) Alcoa0333.

Vlnovce byly korozí degradovány rovněž jen lokálně, ovšem zpravidla přes celou tloušťku materiálu (0,07 mm), viz Obr. 6.2.6. Mechanismus korozního napadení byl také mezikrystalový.



Obr. 6.2.6 a) Koroze vlnovců, b) celkový pohled na vlnovce – trubka FA7857.

SHRNUTÍ:

Z metalografického hodnocení je zřejmé, že nízká hodnota pH a přítomnost chloridů ve zkušebním roztoku způsobily výrazné korozní napadení trubek i vlnovců. A protože je mezikrystalová koroze nepřipustná, byly vzorky vyhodnoceny jako nevyhovující.

Bylo tedy nutno navrhnout nové materiály trubek s takovými vlastnostmi, aby byly schopny odolat agresivnímu prostředí jak modelových kondenzátů tak prostředí nízkotlakého EGR systému. Jak již bylo uvedeno výše, jedná se o finančně náročný test, proto bylo rozhodnuto ověřovat materiály ve statickém testu tak, aby bylo možno otestovat vyšší počet různých materiálových variant.

6.3 STATICKÝ TEST I

Účelem tohoto testu byla relativně rychlá a cenově dostupná varianta ověření povlakovaných materiálů pro následné otestování v dynamickém testu I.

PRŮBĚH TESTU:

Vzorky pro tento test byly vyrobeny z trubek a připájených vlnovců. Po naplnění kondenzátu byly trubky utěsněny, viz *Obr. 6.3.1*, a umístěny do komory s teplotou 85°C po dobu 1500 hodin, viz *Obr. 6.1.2*. Po expozici následovalo metalografické vyhodnocení.

Specifikace kondenzátů statického testu pro ověření interní koroze chladičů plnicího vzduchu se opíraly o údaje norem společností A a B, jejichž složení je uvedeno níže, viz *Tab. 6.3.1*. Jde o směsi kyselin dusičné, sírové, chloro- a fluorovodíkové aj. s pH hodnotami 2,5 respektive 4,5. Zmíněné kondenzáty byly použity v dynamických testech [V2].

Tab. 6.3.1 Složení kondenzátů podle specifikace původců A a B.

	pH	HNO ₃ [mg/l]	H ₂ SO ₄ [mg/l]	HCl [mg/l]	HF [mg/l]
č.2	4,5	44,8	77,3	73,3	-
č.1	2,5	80,9	26,3	22,6	69

Pro tento test byly použity vzorky povlakovaných trubek s připájenými vnitřními vlnovci. První povlak byl dvouvrstvý epoxy-fenolový tzv. EPE, o tloušťce 10 µm a s maximální korozní odolností při teplotách do 250°C, barva zlatá. Druhý povlak byl černý, na siloxanové bázi, tzv. SPCC (Siloxane based polymer pre-ceramic coating), s tloušťkou do 20 µm, s odolností do 300°C, viz kap. 5.1, povlak byl nanesen i na vnitřní straně trubek. Materiály vlnovců byly ze slitiny EN AW-3003 a EN AW-3003 + 1,5% Zn a materiály trubek ze slitiny EN AW-3017, složení materiálů je uvedeno níže, viz *Tab. 6.3.2*. Všechny vzorky byly podrobeny působení obou kondenzátů.

Tab. 6.3.2 Chemické složení slitin EN AW-3003 a EN AW-3103 [26].

Slitina	Složení (hm.%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní
3003	0.6	0.7	0.05-0.2	1-1.5	-	-	0.1	-	0.15
3017	0.25	0.25-0.45	0.25-0.4	0.8-1.2	0.1	0.15	0.1	0.05	0.15

VYHODNOCENÍ:

Vzorky po testu nevykazovaly žádné korozní napadení povrchu trubek. Vlnovce byly místy zkorodovány až na 20% původní tloušťky. Povlaky tedy dokázaly zabránit kontaktu mezi zkušebním roztokem a základním materiálem. Proto bylo rozhodnuto otestovat povlakované materiály i v dynamickém testu. Hodnoty měření zbytkové tloušťky vlnovců jsou uvedeny v tabulce, viz *Tab. 6.3.3*.

Z každého vzorku trubky byly připraveny 3 vzorky, měření zbytkové tloušťky vlnovců bylo provedeno na 8 místech každého vzorku.

SHRNUTÍ:

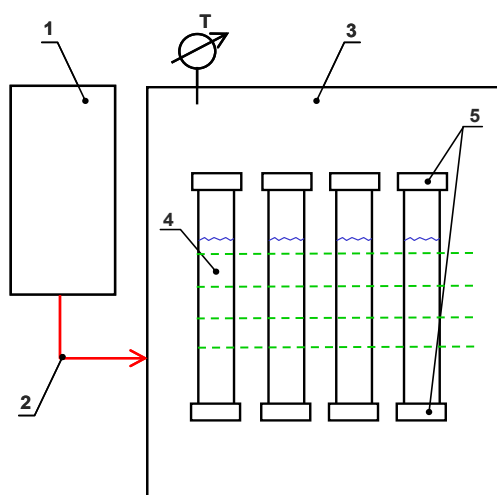
Na základě metalografického zkoumání bylo zřejmé, že vzorky s povlakem jednoznačně vyhovují požadavkům korozní odolnosti vůči modelovým kondenzátům, proto byly doporučeny pro ověření v dynamickém testu I, který simuluje provozní podmínky.

Tab. 6.3.3 Naměřené hodnoty zůstatkové tloušťky vlnovců po statickém testu I.

	Kondenzát	Zbytková tloušťka vlnovců [μm]							
Vlnovec+trubka s EPE	č.2	22,4	55,7	26,7	25,8	65,3	51,2	32,8	65,1
		38,2	49,6	41,3	55,8	61,2	31,2	20,8	41,2
		14,3	29,8	39,6	38,5	52,8	60,3	49,6	51,2
Vlnovec+trubka s EPE	č.1	25,9	35,3	45,7	49,3	52,1	20,8	22,4	53,6
		19,8	59,4	42,2	45,6	47,5	35,8	61,2	23,5
		22,8	15,2	24,8	39,7	49,7	58,9	42,7	60,3
Vlnovec+trubka s SPCC	č.2	62,1	51,3	45,8	16,2	39,7	48,5	60,1	21,2
		25,8	29,8	61,2	54,3	27,9	48,8	57,5	24,5
		29,5	35,8	61,2	55,3	21,3	45,6	34,7	37,2
Vlnovec+trubka s SPCC	č.1	62,8	24,5	25,1	46,2	21	28,9	35,7	43,4
		44,5	46,8	14,9	29,6	49,8	55,6	51,3	41,7
		62,3	29,4	54,2	43,2	44,8	21,7	49,8	45,6

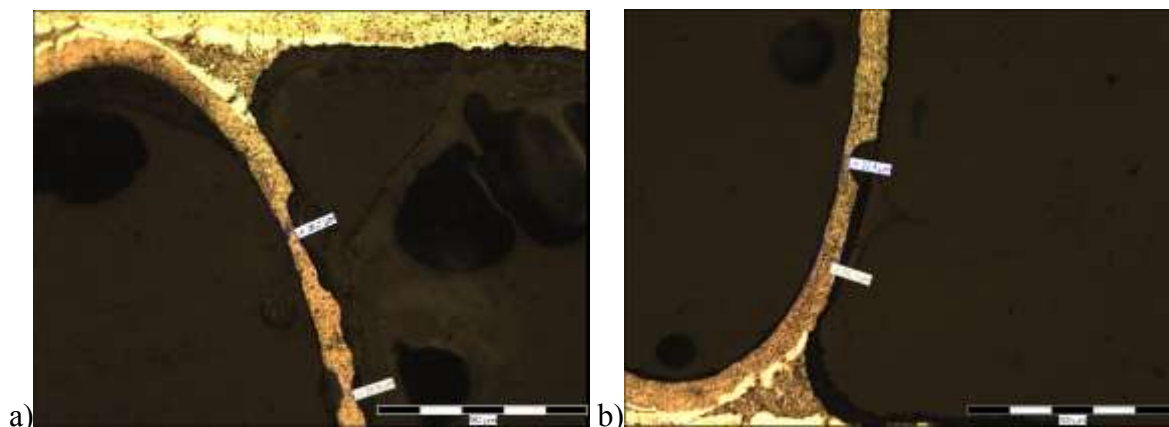


Obr. 6.3.1 Fotografie vzorků povlakovaných materiálů z testovací komory statického testu I.

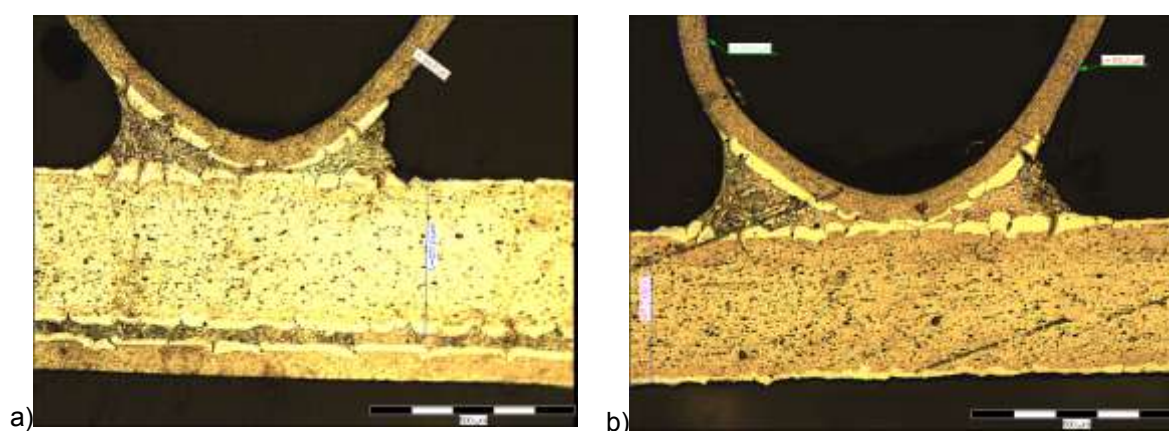


- 1 – tepelný zdroj
- 2 – okruh
- 3 – teplotní komora
- 4 – vzorky napuštěny kondenzátem
- 5 – těsnění vzorků
- T – termostat

Obr. 6.3.2 Schéma umístění vzorků v komoře při statickém korozním testu.



Obr. 6.3.3 Metalografické snímky vlnovců, a) vlnovec a trubka s SPCC povlakem, b) vlnovec a trubka s EPE povlakem.



Obr. 6.3.4 Metalografický výbrus povlakovaných vzorků a) měřená tloušťka trubky s SPCC, b) měřená tloušťka trubky s EPE.

6.4 STATICKÝ TEST II

Úkolem tohoto testu bylo ověřit větší množství materiálových kombinací z důvodu již zmíněné vysoké ceny dynamického testování a povlakovaných materiálů a z důvodu nevyhovujících výsledků materiálů použitých v dynamickém testu II. Neméně důležitým úkolem této zkušební metody bylo rovněž porovnání korozního účinku jednotlivých kondenzátů na testované materiály. Cílem testu bylo kromě nalezení vhodných materiálů pro stavbu chladičů stlačeného vzduchu i schválení metodiky statického testu II v porovnání s dynamickým testem II ve smyslu možnosti ověřování materiálů pro sériové testování.

Definování statického testu II a následné provedení bylo konzultováno, jak s výrobcí materiálů, kteří mají bohaté zkušenosti s testováním materiálů pro automobilový průmysl, tak s výrobcí automobilů a jejich vývojovými laboratořemi, tak samozřejmě i s dalšími korozními specialisty z praxe. Bylo vycházeno jak z již provedeného statického testu I tak z doporučení automobilových společností. Na tomto základě byly vybrány 4 modelové roztoky kondenzátů, které simulují produkty kondenzace vznikající v chladiči plnicího vzduchu během provozu. Jejich složení je uvedeno v tabulce, viz *Tab 6.4.1*.

Tab. 6.4.1 Složení testovacích kondenzátů.

	Č.1	Č.2	Č.3	Č.4
pH	2,5	4,5	2	3
Kys.dusičná [mg/l]	80,9	44,8	58	130
Kys.sírová [mg/l]	26,3	77,3	4	1340
Kys.mravenčí [mg/l]	-	-	-	99
Kys.octová [mg/l]	-	-	-	897
Kys.chlorovodíková [mg/l]	22,6	73,3	1	21
Kys.fluorovodíková [mg/l]	69	-	-	-
Formaldehyd [mg/l]	-	-	-	171
NaNO ₂ [mg/l]	-	-	-	207
Na ₂ SO ₃ [mg/l]	-	-	-	139
Kationty [mg/l]				
Si	4,9			
Al	0,3			
Cr	0,1			
Cu	2,5			
Fe	0,7			
Ni	5,7			
Pb	0,5			
Ca	8,1			
Zn	28,8			
Mg	0,7			

Protože ve statickém testu jde o ověření chování materiálů vůči korozi vnitřního povrchu použitých materiálů, bylo rozhodnuto použít pouze vzorky jednotlivých materiálů, nikoliv trubky s vnitřní vestavbou vlnovců, a zhotovit je jen z materiálů exponovaných vůči tomuto prostředí. Vzorky pro zkoušky byly tedy zhotoveny z plátů (z nichž se pro chladiče plnicího vzduchu vyrábí trubky) a z vlnovců připájených mezi pláty, viz *Obr. 6.4.1 a*). Jak již bylo uvedeno dříve, při výběru materiálu se vycházelo z již používaných materiálů pro stavbu standardních tepelných výměníků používaných v automobilovém průmyslu. Vybráno bylo 6 slitin, jejichž obchodní názvy jsou PR 3916, FA 7873 a FA 7857, Hogal 3527 a Hogal 3542 a konečně Alcoa 0333. Výrobce první z nich je Alcan(Constellium), dalších dvou pak Sapa, výrobcem Hogalu je firma Aleris a zbývající materiál má výrobce Alcoa uvedeného v názvu.

Pláty vyrobené ze slitin FA 7857 a 0333 byly již testovány v druhém dynamickém testu, ale aby bylo možno porovnat působení korozního napadení s korozním působením v předchozích testech, bylo nutno podrobit následující zkoušce již otestované materiály. Materiály vlnovců byly vyrobeny v Al Invest Břidličná, jednalo se o jakosti dle EN AW-3003, a z EN AW-3003+1,5% Zn. Složení slitin je uvedeno v tabulce, viz *Tab. 6.4.2*. Vlnovce se vyrábí zpravidla ze slitiny EN AW-3003, případně jejich modifikací, nebo z čistého hliníku. Je-li nutná katodická ochrana materiálu trubky/plátu, přidává se do slitiny vlnovce zinek, který je vůči hliníku anodou, snižuje tedy korozní potenciál vlnovce a ten se pak v korozním prostředí v přítomnosti elektrolytu stává vůči trubce/plátu obětovanou anodou. Zkorodování vlnovce sice dochází ke snížení výkonu tepelného výměníku v důsledku

nedostatečného přenosu tepla, ale nedojde k selhání jeho funkce, potažmo k úniku chladicí kapaliny, která proudí uvnitř trubek. Z tohoto důvodu byly vybrány oba typy vlnovců.

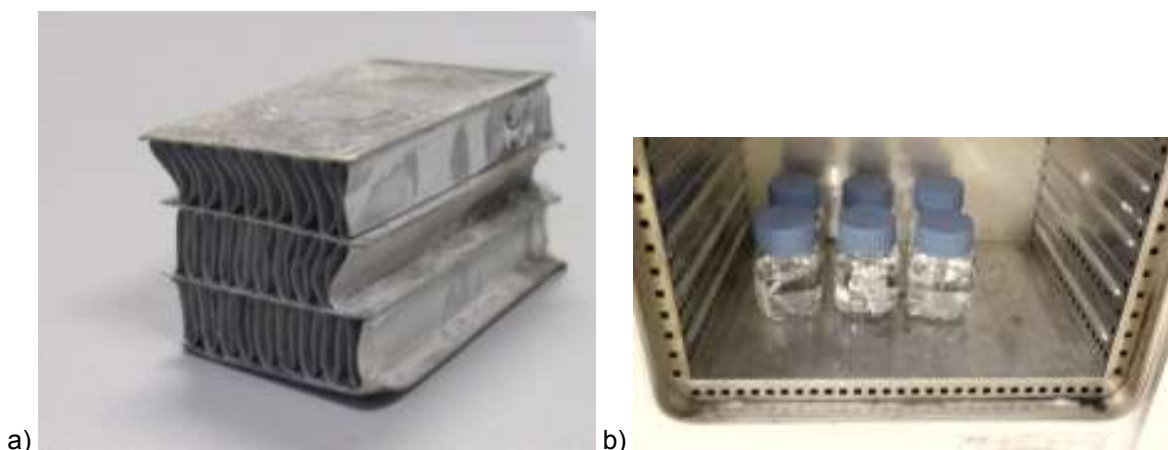
Tab. 6.4.2 Chemické složení slitin EN AW-3003, PR 3916, FA 7873, FA 7857, Hogal 3527, Hogal 3542 a Alcoa 0333.

Slitina		Složení (hm.%)										Tloušťka
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Ostatní	mm
3003	min	-	-	0,05	1	-	-		-	-		0,07
	max	0,6	0,7	0,2	1,5	-	-	0,10	-	-	0,15	
PR3916	min	-	-	0,5	1	-	-	-	0,05	-		0,35
	max	0,3	0,2	0,8	1,4	0,02	-	0,05	0,1	-	0,15	
FA7873	min	-	-	0,7	1,6	-	-	-	-	0,05		0,35
	max	0,6	0,7	1	1,8	0,03	-	0,1	0,1	0,2		
FA7857	min	-	-	0,25	1	-	-	-	0,08	-		0,5
	max	0,5	0,5	0,5	2	0,03	-	0,1	0,25	-		
Hogal 3527	min	0,45	0,34	0,6	0,9		0,05	-				0,4
	max	0,65	0,44	1	1,5	0,1	0,15	-	0,1	0,05	0,15	
Hogal 3542	min			0,4	0,9	0,2	-	-	0,08			0,3
	max	0,1	0,25	0,6	1,2	0,3	0,05	0,05	0,1	-	0,15	
Alcoa 0333	min			0,2	0,8	0,02	-	-	-	-		0,485
	max	0,25	0,6	0,4	1,3	0,1	-	0,25	-	-		

Uvedené slitiny patří do skupiny tzv. long life slitin (LLA). Jde o označení slitin, které se vyznačují vyšší pevností po pájení oproti běžné EN AW-3003 a zvýšenou odolností vůči korozi, viz kap.5.2.

PRŮBĚH TESTU:

Pro statický test II byly zvoleny následující testovací podmínky: vzorky (pláty s připájenými vnitřními vlnovci, viz Obr. 6.4.1) byly ponořeny v kondenzátech a umístěny v testovací komoře o teplotě 85°C.



Obr. 6.4.1 a) Vzorek, b) umístění vzorků během statického testu II v testovací komoře.

Po 1500 hodinách byly vyjmuty a byla na nich provedena metalografická analýza a vyhodnocení (druh koroze a její průběh). Složení všech použitých materiálů je uvedeno v tabulce, viz Tab. 6.4.2.

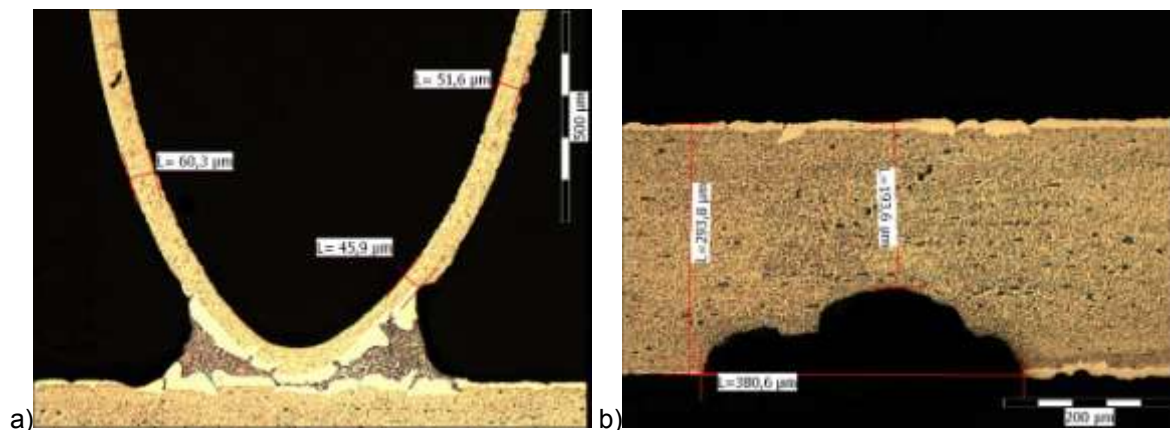
SHRNUTÍ:

Z počtu kombinace dvanácti materiálů a čtyř kondenzátů vyplývá, že bylo v první fázi testováno celkem čtyřicet osm vzorků. Jejich metalografické vyhodnocení bylo prováděno následujícím postupem: vzorky byly v polovině délky rozříznuty a zality do epoxidové pryskyřice, po jejím vytvrzení následovalo broušení a leštění vzorků a mikroskopická analýza na světelném mikroskopu Olympus BX51M. Zkoumaly se jen prostřední dva pláty vzorku a k nim připájené vlnovce, vždy čtyři z každé strany plátu a to tak, aby se eliminoval vliv okrajových částí, které byly korozně více napadeny, viz Obr. 6.4.2.



Obr. 6.4.2 Označení hodnocených oblastí vzorků po statickém testu.

Při vyhodnocení vlnovců byla měřena zbytková tloušťka ve třech nejvíce napadených místech, to znamená 48 hodnot tloušťky vlnovců pro jeden vzorek. Příklady měření zbytkové tloušťky vlnovce a plátu jsou uvedeny na snímcích, viz Obr. 6.4.3.



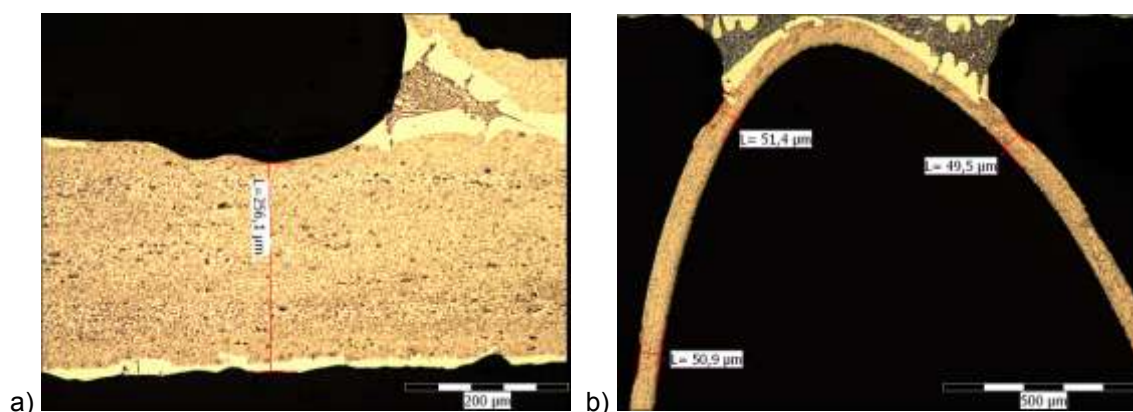
Obr. 6.4.3 Měření zbytkové tloušťky a) vlnovce a b) plátu.

Prostřední dva pláty pak byly měřeny ve třech místech s maximální hloubkou napadení, tzn. s nejmenší zbytkovou tloušťkou, příp. v místech s mezikrystalovou korozí, viz Obr. 6.4.3. Pokud byl úbytek tloušťky větší než 30% původní tloušťky materiálu nebo za přítomnosti mezikrystalové koroze, byl materiál klasifikován jako nevyhovující. Původní tloušťka plátů je uvedena v tabulce, viz Tab. 6.4.3.

Tab. 6.4.3 Měření výchozí tloušťky plátů ve třech místech.

Materiál	Měření tloušťky ve 3 místech [mm]			Průměr [mm]
	1	2	3	Ø
PR 3916	0,345	0,344	0,349	0,346
FA 7873	0,335	0,332	0,336	0,334
FA 7857	0,406	0,411	0,411	0,409
Hogal 3527	0,391	0,389	0,391	0,390
Hogal 3542	0,301	0,301	0,298	0,3
Alcoa 0333	0,493	0,479	0,493	0,488

Na základě výsledků zkoumání mikroskopických snímků vzorků testovaných v kondenzátu č.3 bylo rozhodnuto eliminovat tyto vzorky z dalšího zkoumání a rovněž vynechat tento kondenzát z dalšího testování. Toto rozhodnutí bylo učiněno vzhledem k mírnému koroznímu napadení vzorků v tomto médiu. Na žádném ze vzorků nebyla shledána mezikrystalová koroze, korozní napadení bylo pouze povrchové jak na plátech, tak i vlnovcích, viz Obr. 6.4.4. Efekt mírného korozního působení kondenzátu je i přes nízkou hodnotu pH dán jeho mnohonásobně nižším obsahem kyselin, zejména chlorovodíkové a sírové, oproti ostatním testovacím kondenzátům.



Obr. 6.4.4 Vybraná ukázka mírného napadení a) plátu (Alcan 3916) a b) vlnovce (EN AW-3003) v kondenzátu č.3.


Na následujícím příkladu naměřených hodnot zbytkové tloušťky vlnovců pro kombinaci materiálů plátu Sapa 7857 a vlnovce jakosti 3003+1,5%Zn (vzorek č.6) v tabulce, viz Tab. 6.4.4, je předvedeno, jak probíhalo měření a vyhodnocování testu. Označení 6.1 znamená vzorek č. 6 testovaný v kondenzátu č.1, atd. Nulové hodnoty zbytkové tloušťky znamenají korozi skrz celou tloušťku vlnovců.

Tab. 6.4.4 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců po statickém testu I v kondenzátech č.1, 2 a 4.

Vzorek 6.1 [mm]		Vzorek 6.2 [mm]		Vzorek 6.4 [mm]	
0,05	0,04	0,06	0,06	0,05	0
0,06	0,05	0,07	0,07	0,05	0
0,06	0,06	0,08	0,07	0,05	0,02
0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06
0,06	0,04	0,07	0,07	0,06	0,06
0,07	0,05	0,07	0,07	0,06	0,06
0,04	0,06	0,06	0,02	0,05	0,05
0,04	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06
0,05	0,06	0,06	0,08	0,06	0,06
0,04	0,05	0,05	0	0,05	0,05
0,04	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05
0,05	0,05	0,09	0,07	0	0,05
0,07	0,06	0,05	0,07	0,04	0
0,07	0,06	0,07	0,08	0,04	0
0,07	0,06	0,1	0,09	0,04	0
0,06	0,07	0,06	0	0,04	0,02
0,07	0,08	0,07	0	0,05	0,02
0,08	0,08	0,07	0,05	0,05	0,03
0,01	0,05	0,07	0	0,03	0,03
0,02	0,07	0,07	0	0,03	0,03
0,04	0,07	0,08	0,06	0,03	0,05
0,05	0,04	0,06	0	0,03	0
0,06	0,07	0,07	0	0,05	0,01
0,06	0,08	0,08	0,07	0	0,05

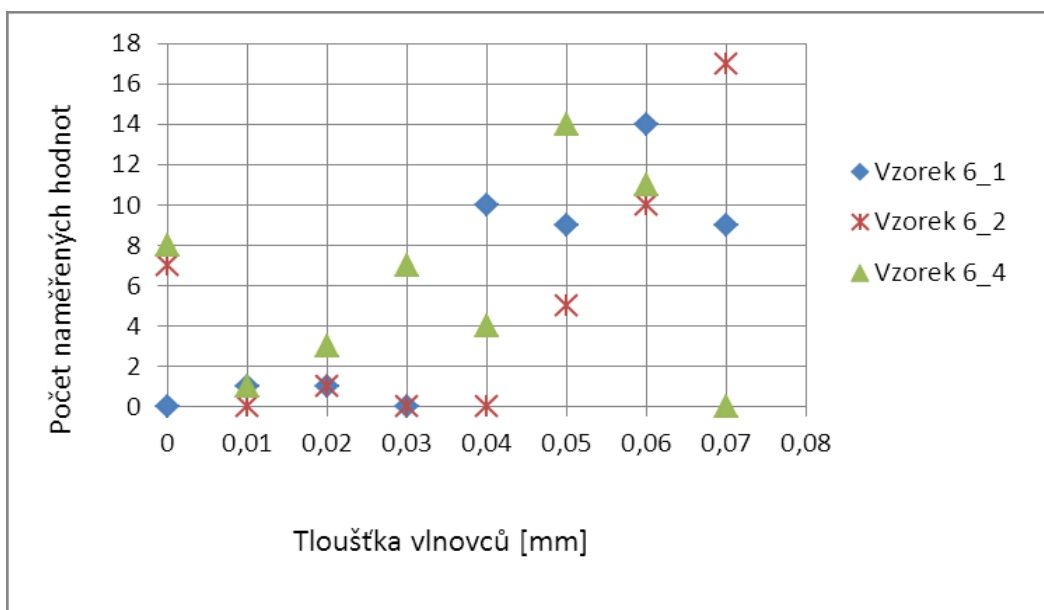
Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky plátu vzorku č.6 jsou uvedeny v tabulce, viz Tab. 6.4.5. Označení opět odpovídá typu vzorku a kondenzátu, v němž byl vzorek exponován, tedy materiál plátu Sapa 7857 a vlnovce jakosti 3003+1,5%Zn. Původní tloušťka plátu materiálu Sapa 7857 byla 0,41 mm. Koroze tedy nepřekročila maximální povolenou hloubku do 30%, ovšem červené zvýraznění znamená, že druhem napadení plátu byla mezikrystalová koroze.

Tab. 6.4.5 Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky plátu vzorku č.6.

Vzorek 6.1 [mm]	Vzorek 6.2 [mm]	Vzorek 6.4 [mm]	
0,32	0,33	0,3	 = MZK
0,32	0,34	0,31	
0,33	0,35	0,32	
0,31	0,35	0,33	
0,32	0,36	0,31	
0,35	0,37	0,31	

Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců byly pro přehlednost uvedeny do grafické podoby, viz Obr. 6.4.5, kde je evidentní, že vlnovce vzorku č.6 byly nejméně napadeny v kondenzátu

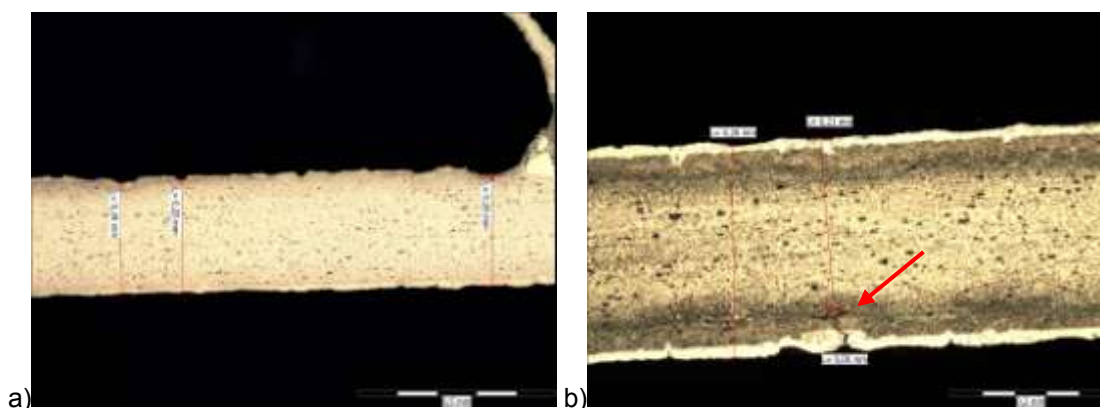
č.1 a nejvíce v kondenzátu č.4. Nutno dodat, že výběr materiálů pro další testování byl zvolen na základě výsledků koroze plátů nikoli vlnovců, protože pro funkci chladičů stlačeného vzduchu jsou zásadní pláty, z kterých se vyrábí trubky, v nichž proudí chladicí médium, nikoli vlnovce, které výkonnost tepelného výměníku mohou snížit, ne však zcela omezit jeho funkci.



Obr. 6.4.5 Grafické znázornění naměřených zbytkové tloušťky vlnovců vzorku č.6 po statickém testu II v kondenzátech č.1, 2 a 4.

6.4.1 VYHODNOCENÍ PŮSOBNÍ 1. A 2. KONDENZÁTU VE STATICKÉM TESTU II

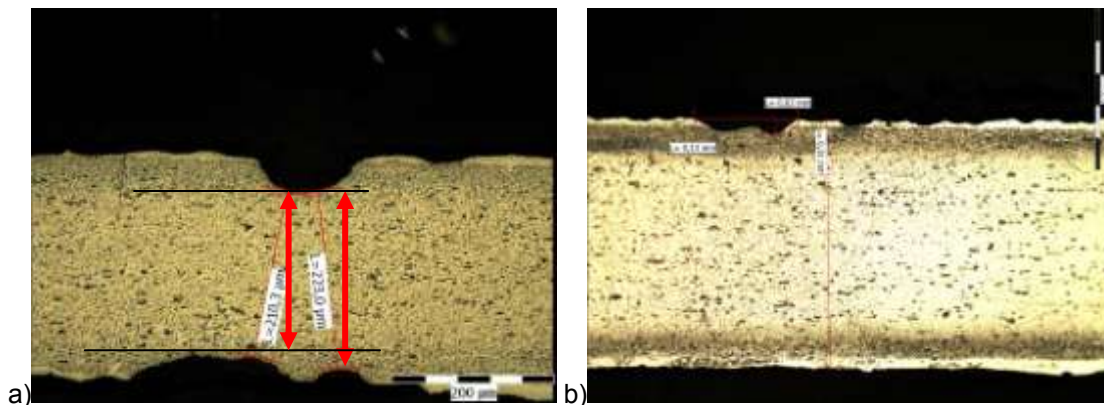
Následující vybrané snímky ukazují míru korozního napadení plátů jednotlivých vzorků testovaných v kondenzátu č.1, kdy jsou vždy vedle sebe uvedeny stejné materiály ovšem s různou kombinací vlnovce.



Obr. 6.4.6 Mikroskopické snímky plátů materiálu Alcan 3916 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu v 1.kondenzátu.

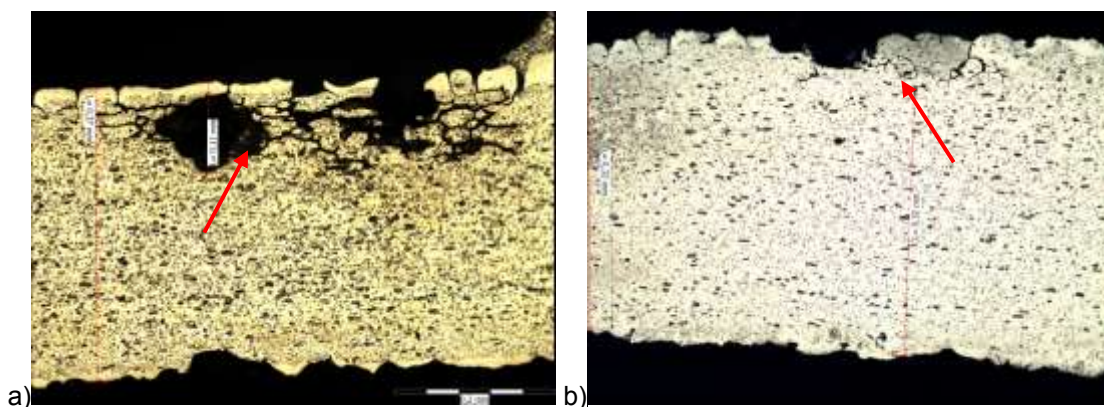
Materiál Alcan 3916 s vlnovcem bez přídavku zinku nevykazoval výrazné napadení v 1. Kondenzátu jako tentýž materiál s vlnovcem obsahujícím zinek, viz Obr. 6.4.6. Na snímku vpravo je zřejmá mezikrystalová koroze zasahující do ochranné vrstvy zvané brown band (označena červenou

šipkou), která se jeví jako tmavě hnědé pásy pod povrchem vzorku. Jejich tvorba je vysvětlena v kap.5.2.



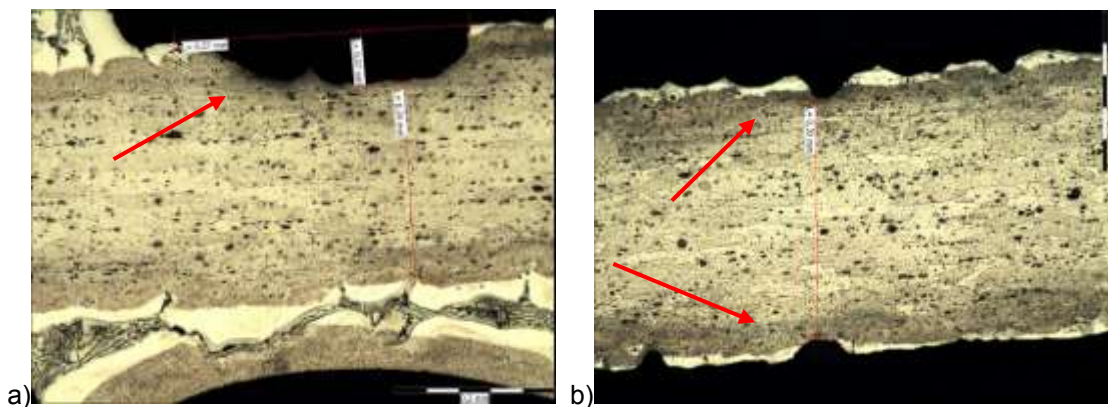
Obr. 6.4.7 Korozní napadení plátů materiálu Sapa 7873 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu v 1. Kondenzátu.

Koroze plátů materiálu Sapa 7873 s vlnovcem obsahujícím zinek byla pouze povrchová, viz Obr. 6.4.7, kdežto u plátů s vlnovcem bez zinku bylo napadení výrazné s oboustranným úbytkem tloušťky materiálu okolo 30%.



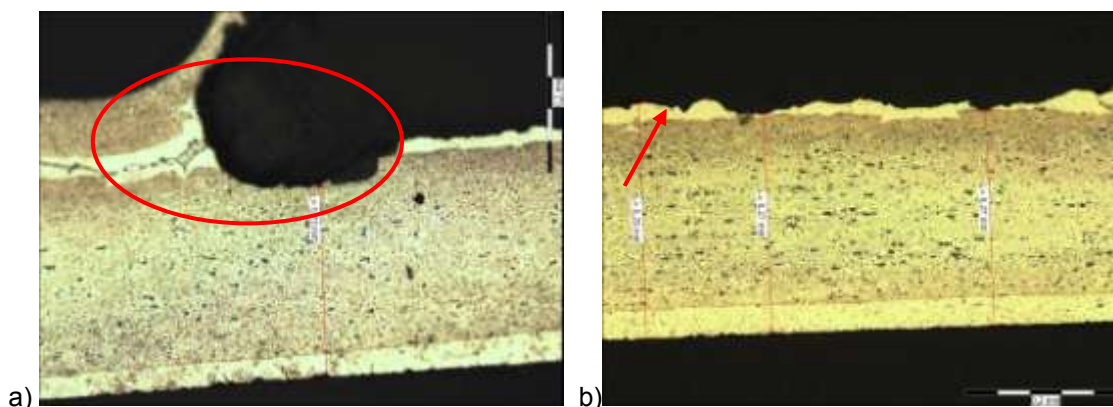
Obr. 6.4.8 Mikroskopické snímky plátů materiálu Sapa 7857 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu v 1. Kondenzátu.

Materiál plátů Sapa 7857 ve statickém testu korodoval mezikrystalově (označeno šipkami) v obou případech kombinace plátů s vlnovci ať už se zinkem nebo bez, viz Obr. 6.4.8.



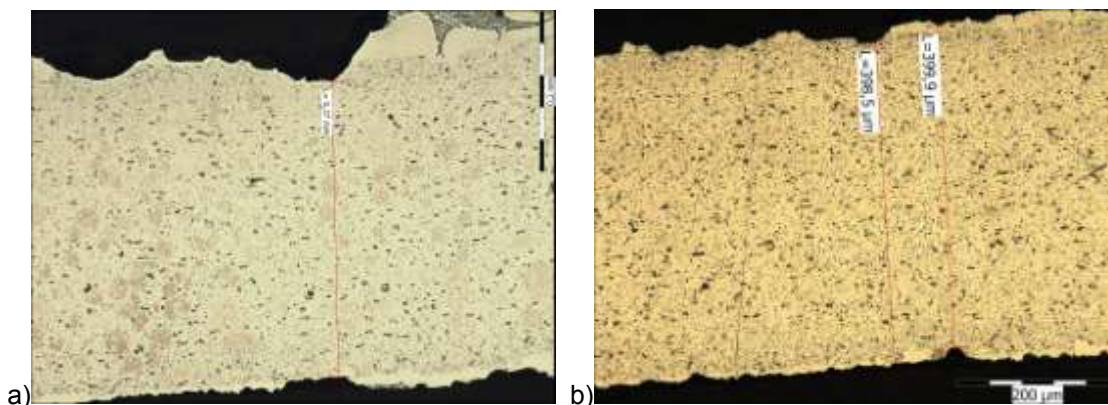
Obr. 6.4.9 Mikroskopické snímky plátů materiálu Aleris 3527 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu v 1. Kondenzátu.

Koroze materiálu Aleris 3527 postupovala pouze do obětované ochranné vrstvy brown band, viz Obr. 6.4.9, i když v kombinaci s vlnovcem bez zinku byl zaznamenán větší rozsah napadení v oblastech u pájených spojů (označeno šipkou).



Obr. 6.4.10 Mikroskopické snímky plátů materiálu Aleris 3542 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu v 1. Kondenzátu.

Stejně jako u vzorků materiálu Aleris 3527 byly u vzorků plátů vyrobených ze slitiny 3542 téhož výrobce napadány oblasti u pájených spojů (označeno červeně) v případě kombinace s vlnovcem bez přídavku zinku, viz Obr. 6.4.10. V druhé kombinaci byly pláty zkorodovány pouze v oblasti plátování na povrchu trubky (světlá vrstva na povrchu).



Obr. 6.4.11 Mikroskopické snímky plátů materiálu Alcoa 0333 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu v 1. Kondenzátu.

Podobně tomu tak bylo i u vzorků materiálu Alcoa 0333 jako v předchozích případech (Obr. 6.4.11), kdy byly napadány oblasti u pájených spojů v kombinaci s vlnovcem bez přídavku zinku. V druhé kombinaci byly pláty opět zkorodovány pouze v oblasti plátování na povrchu trubky (světlá vrstva na povrchu). Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky plátů testovaných v kondenzátu č.1 jsou pak uvedeny v tabulce, viz Tab. 6.4.6, kdy červené zvýraznění znamená zjištěný mezikrystalový průběh koroze a oranžové zvýraznění úbytek materiálu větší než 30 %. Obojí nevyhovuje stanoveným požadavkům.

Tab. 6.4.6 Zbytková tloušťka plátů testovaných v kondenzátu č.1 po statickém testu II.

Č.vzorčku	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]							Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec									
1.1	Alcan 3916	3003	0,24	0,26	0,27	0,28	0,27	0,27	0,24	0,35	
2.1	Alcan 3916	3003+1,5%Zn	0,21	0,24	0,26	0,27	0,25	0,27	0,24	0,35	
3.1	Sapa 7873	3003	0,25	0,24	0,27	0,23	0,21	0,25	0,23	0,33	
4.1	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,24	0,26	0,27	0,29	0,29	0,29	0,23	0,33	
5.1	Sapa 7857	3003	0,25	0,26	0,23	0,17	0,29	0,30	0,29	0,41	
6.1	Sapa 7857	3003+1,5%Zn	0,32	0,32	0,33	0,31	0,32	0,35	0,29	0,41	
7.1	Aleris 3527	3003	0,32	0,33	0,32	0,31	0,33	0,33	0,27	0,39	
8.1	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,31	0,31	0,31	0,30	0,31	0,30	0,27	0,39	
11.1	Aleris 3542	3003	0,25	0,25	0,23	0,22	0,24	0,26	0,21	0,30	
12.1	Aleris 3542	3003+1,5%Zn	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,21	0,30	
13.1	Alcoa 0333	3003	0,37	0,38	0,39	0,35	0,38	0,39	0,34	0,49	
14.1	Alcoa 0333	3003+1,5%Zn	0,36	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,34	0,49	

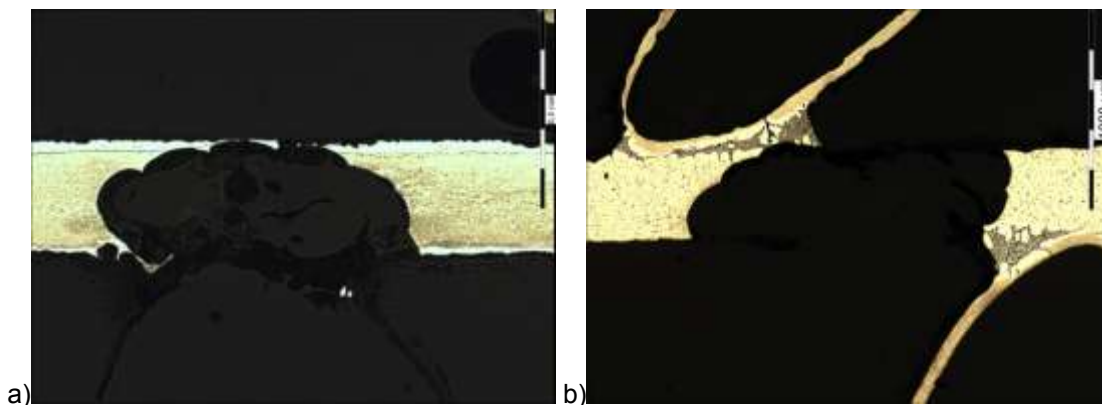
= MZK

= úbytek >30%

Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že koroze plátů měla mezikrystalový průběh pouze u vzorku materiálu Sapa 7857, v kombinaci s oběma materiály vlnovců, a u vzorku Alcan 3916

s vlnovcem jakosti 3003 s přídavkem Zn. Ve složení se materiál Sapa 7857 liší oproti ostatním slitinám ve vyšším obsahu manganu a titanu, což ale nevysvětluje mezikrystalový průběh koroze, kdy mangan v těchto slitinách odolnost vůči korozi zvyšuje a titan podporuje vznik ochranné vrstvy tzv. brown band, která má zajistit laterální průběh koroze. Mezikrystalová koroze u slitiny Alcan 3916 zasahovala „pouze“ do ochranné vrstvy, i když povolená hranice 30% úbytku tloušťky materiálu byla překročena. Korozní napadení ostatních slitin bylo akceptovatelné, kromě jednoho měření u slitiny Sapa 7873, kde úbytek materiálu přesahoval povolených 30%. Korozní napadení vzorků s vlnovcem bez přídavku zinku probíhalo přednostně u pájených spojů v materiálové kombinaci, kde nepřítomnost zinku dostatečně nezajistila funkci vlnovce jako obětované anody.

Porovnáním složení kondenzátů č.1 a 2 lze očekávat agresivnější působení kondenzátu č. 2, který na rozdíl od 1. Kondenzátu obsahuje 12x méně kyseliny sírové, ale naopak obsahuje kyselinu chlorovodíkovou, což se projevilo zejména na vzorcích Aleris 3542 a Alcoa 0333, které prokorodovaly skrz celou tloušťku, viz Obr. 6.4.12.





Obr. 6.4.12 Prokorodování plátů skrz celou tloušťku materiálu a) Aleris 3542 a b) Alcoa 0333.

Typ korozního napadení ostatních vzorků testovaných v 2. Kondenzátu je velice podobný způsobu napadení materiálů v 1. Kondenzátu, proto zde nejsou uvedeny snímky ostatních vzorků, pouze tabulka s naměřenými hodnotami zbytkové tloušťky plátů, viz Tab. 6.4.7.

Tab. 6.4.7 Zbytková tloušťka plátů testovaných v kondenzátu č.2 po statickém testu II.

Č.vzorku	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]						Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec								
1.2	Alcan 3916	3003	0,27	0,27	0,26	0,27	0,28	0,30	0,24	0,35
2.2	Alcan 3916	3003+1,5%Zn	0,24	0,24	0,21	0,25	0,24	0,21	0,24	0,35
3.2	Sapa 7873	3003	0,12	0,07	0,19	0,26	0,28	0,27	0,23	0,33
4.2	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,25	0,28	0,29	0,26	0,26	0,27	0,23	0,33
5.2	Sapa 7857	3003	0,29	0,31	0,31	0,31	0,32	0,33	0,29	0,41
6.2	Sapa 7857	3003+1,5%Zn	0,33	0,34	0,35	0,50	0,36	0,37	0,29	0,41
7.2	Aleris 3527	3003	0,31	0,32	0,24	0,30	0,30	0,30	0,27	0,39
8.2	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,29	0,31	0,32	0,30	0,31	0,32	0,27	0,39
11.2	Aleris 3542	3003	0,00	0,19	0,22	0,25	0,16	0,22	0,21	0,30
12.2	Aleris 3542	3003+1,5%Zn	0,25	0,27	0,27	0,23	0,24	0,25	0,21	0,30
13.2	Alcoa 0333	3003	0,13	0,27	0,27	0,32	0,00	0,40	0,34	0,49
14.2	Alcoa 0333	3003+1,5%Zn	0,38	0,39	0,40	0,40	0,41	0,40	0,34	0,49

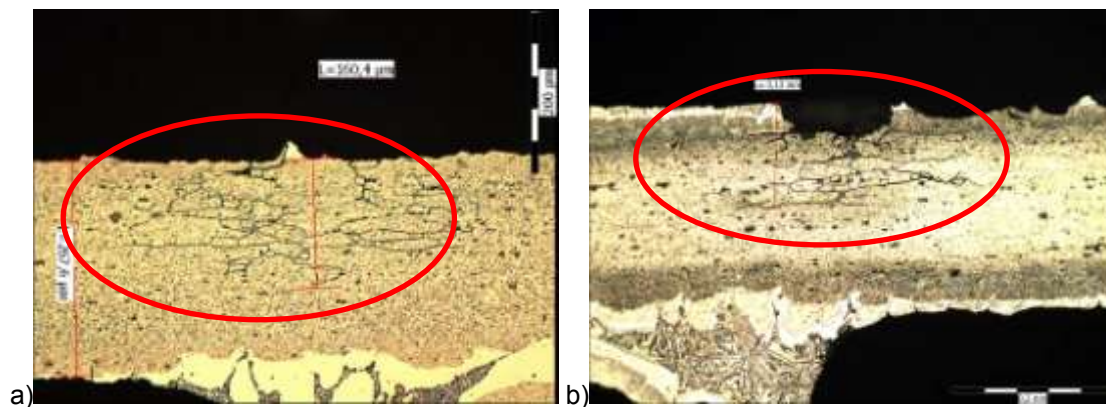
 = MZK

 = úbytek >30%

Z již výše zmíněného mírného působení kondenzátu č.3 zde nejsou uvedeny snímky z testování v tomto kondenzátu. Souhrn vyhodnocení všech kondenzátů je pak uvedeno v tabulce, viz Tab. 6.4.9 v následující kapitole.

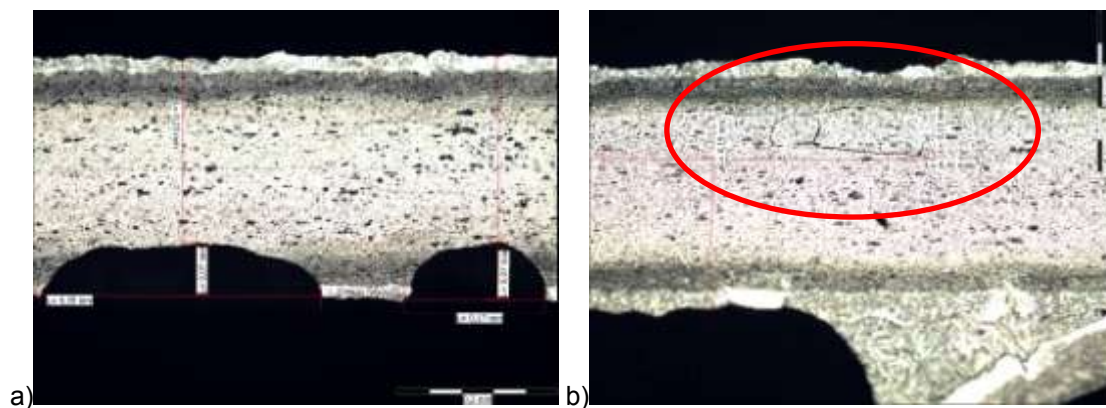
6.4.2 VYHODNOCENÍ PŮSOBNÍ 4. KONDENZÁTU VE STATICKÉM TESTU II

Na rozdíl od předešlých výsledků statického testu II. v ostatních kondenzátech vykazovaly ve 4. kondenzátu všechny vzorky kromě Aleris 3527 a 3542 výrazné mezikrystalové korozní napadení. Kondenzát č.4 byl tedy nejagresivnější ze všech testovaných, což je zřejmé z následujících snímků viz Obr. 6.4.13 až Obr. 6.4.18. Jeho agresivita je zřejmě způsobena vyššími podíly kyselin, zejména pak kyseliny sírové, jejíž obsah je 17x vyšší než u kondenzátu č.2 s druhým nejvyšším obsahem této kyseliny. To podporuje domněnku, že nejen kyselina chlorovodíková, ale i obsah kyseliny sírové má značný vliv na korozi těchto slitin.

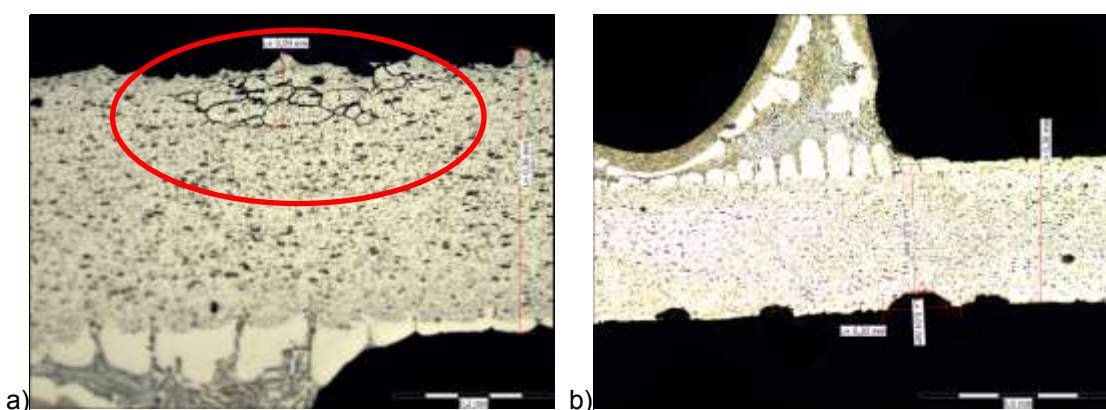


Obr. 6.4.13 Mikroskopické snímky plátů materiálu Alcan 3916 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu ve 4. Kondenzátu.

Na snímcích plátů materiálu Alcan 3916, viz Obr. 6.4.13 je zřejmá mezikrystalová koroze zasahující do hloubky větší než polovina tloušťky. Vzorky jednoznačně nevyhověly testu.

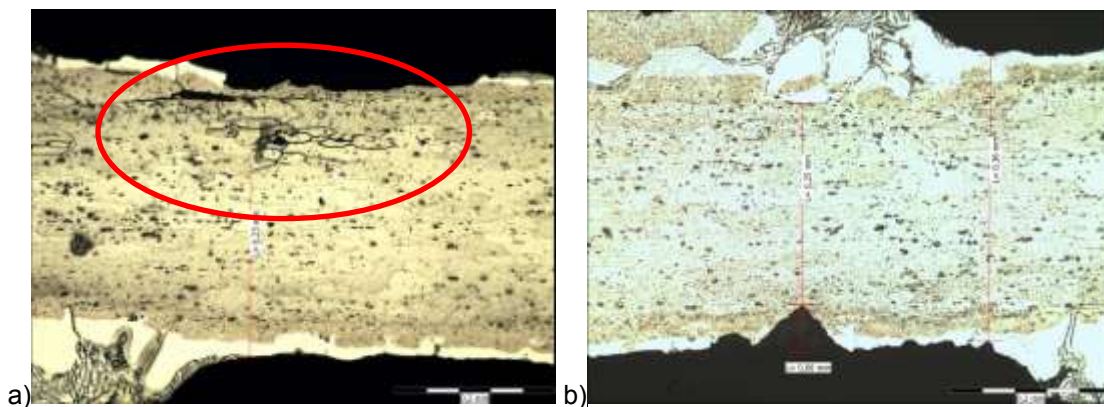


Obr. 6.4.14 Mikroskopické snímky plátů materiálu Sapa 7873 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu ve 4. Kondenzátu.



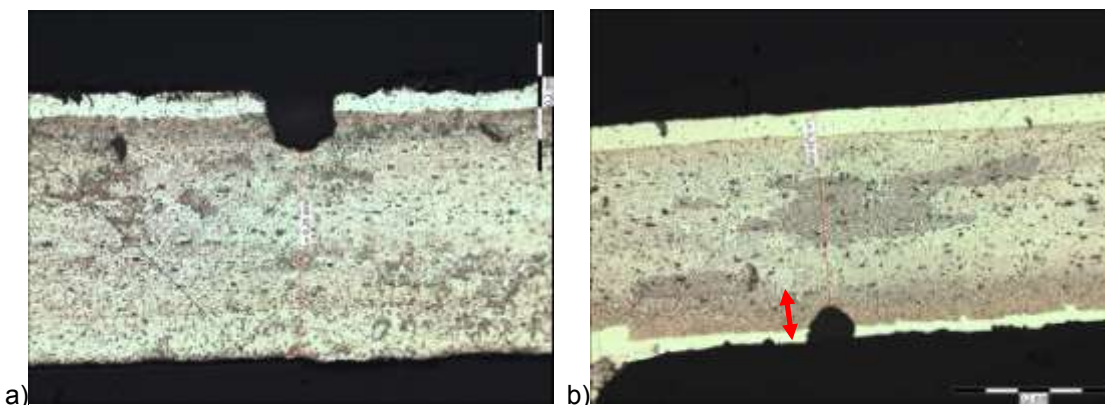
Obr. 6.4.15 Mikroskopické snímky plátů materiálu Sapa 7857 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu ve 4. Kondenzátu.

Rovněž slitiny Sapa 7873, viz Obr. 6.4.14 a 7857, viz Obr. 6.4.15, nevyhověly testu z důvodu mezikrystalové koroze přesahující 30% tloušťky materiálu.



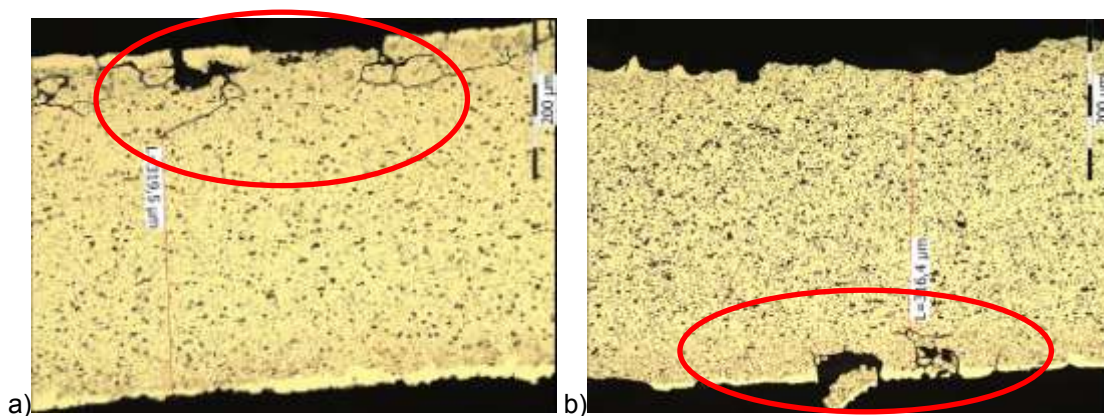
Obr. 6.4.16 Mikroskopické snímky plátů materiálu Aleris 3527 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu ve 4. Kondenzátu.

Slitina Aleris 3527 s vlnovcem bez zinku opět korodovala mezikrystalově do hloubky přes 30% celkové tloušťky plátu. Ovšem v kombinaci s vlnovcem obsahujícím zinek nebylo mezikrystalové napadení zpozorováno vůbec, probíhající koroze se nedostala přes ochrannou vrstvu (tmavý pás pod povrchem, viz Obr. 6.4.16).



Obr. 6.4.17 Mikroskopické snímky plátů materiálu Aleris 3542 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu ve 4. Kondenzátu.

Napadení slitiny Aleris 3542 s vlnovcem bez zinku mírně přesahovalo 30% tloušťky plátu, ovšem ve stejné slitině s vlnovcem s přidavkem zinku nedošlo k průniku koroze přes ochrannou vrstvu (šipka označuje ochrannou vrstvu), viz Obr. 6.4.17.



Obr. 6.4.18 Mikroskopické snímky plátů materiálu Alcoa 0333 a) s vlnovcem jakosti 3003, b) s vlnovcem jakosti 3003 + 1,5% Zn po statickém testu ve 4. Kondenzátu.

Materiál Alcoa 0333 nevyhověl testu z důvodu mezikrystalové koroze přesahující 30% tloušťky materiálu a to jak v kombinaci s vlnovcem s přidavkem zinku i bez.

Tabulka (Tab. 6.4.8) s naměřenými hodnotami zbytkové tloušťky plátů vzorků testovaných ve 4. Kondenzátu přehledně označuje materiály napadené mezikrystalovou korozí a materiály s úbytkem tloušťky plátů větším než 30%, které tedy nevyhovují předepsaným kritériím. Pouze materiál Sapa 7873 a Aleris 3542 s vlnovci bez přidavku zinku vyhověly testu, ale v kombinaci s vlnovcem s přidavkem zinku již ne.

Tab. 6.4.8 Zbytková tloušťka plátů testovaných v kondenzátu č.4 po statickém testu II.

Č. vzorku	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]						Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec								
1.4	Alcan 3916	3003	0,11	0,29	0,28	0,26	0,26	0,27	0,24	0,35
2.4	Alcan 3916	3003+1,5%Zn	0,23	0,23	0,24	0,21	0,22	0,14	0,24	0,35
3.4	Sapa 7873	3003	0,27	0,27	0,27	0,23	0,23	0,26	0,23	0,33
4.4	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,23	0,26	0,26	0,19	0,21	0,23	0,23	0,33
5.4	Sapa 7857	3003	0,23	0,19	0,19	0,34	0,35	0,30	0,29	0,41
6.4	Sapa 7857	3003+1,5%Zn	0,30	0,31	0,32	0,33	0,31	0,31	0,29	0,41
7.4	Aleris 3527	3003	0,32	0,32	0,29	0,23	0,23	0,29	0,27	0,39
8.4	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,25	0,30	0,32	0,31	0,33	0,33	0,27	0,39
11.4	Aleris 3542	3003	0,24	0,24	0,25	0,27	0,27	0,28	0,21	0,30
12.4	Aleris 3542	3003+1,5%Zn	0,19	0,20	0,22	0,23	0,24	0,22	0,21	0,30
13.4	Alcoa 0333	3003	0,32	0,36	0,38	0,26	0,28	0,38	0,34	0,49
14.4	Alcoa 0333	3003+1,5%Zn	0,32	0,34	0,38	0,29	0,31	0,34	0,34	0,49

 = MZK	 = úbytek >30%
--	---

Vyhodnocení úplného statického testu II ve všech kondenzátech je pro přehlednost uvedeno v tabulce, viz Tab. 6.4.9, kdy zelené zvýraznění znamená, že vzorek nebyl narušen korozním napadením, případně pouze mírné napadení povrchu, tedy vyhověl testu. Oranžové zvýraznění

znamená, že materiál plátů odolal koroznímu působení, koroze působila na povrchu rovnoměrně, ovšem pájené spoje či vlnovce byly výrazně napadeny, případně úplně zkorodovány. Červené zvýraznění pak označuje materiály, které testu nevyhověly, buď byl úbytek tloušťky materiálů plátů větší jak 30% anebo pláty byly napadeny mezikrystalovou korozí, která je nepřijatelná.

Tab. 6.4.9 Vyhodnocení testovaných materiálů v jednotlivých kondenzátech.

Vzorek	Materiál		Kondenzáty			
	Pláty	Vlnovce	BMW (1)	VW (2)	Mazda (3)	Ford (4)
1	Alcan 3916	3003				
2	Alcan 3916	3003+1.5% Zn				
3	Sapa 7873	3003				
4	Sapa 7873	3003+1.5% Zn				
5	Sapa 7857	3003				
6	Sapa 7857	3003+1.5% Zn				
7	Aleris 3527	3003				
8	Aleris 3527	3003+1.5% Zn				
11	Aleris 3542 mod.	3003				
12	Aleris 3542 mod.	3003+1.5% Zn				
13	Alcoa 0333	3003				
14	Alcoa 0333	3003+1.5% Zn				

Legenda: nevyhovující, plát-OK, vlnovec-nevyhovující, vyhovující

6.4.3 OPAKOVANÝ STATICKÝ TEST II

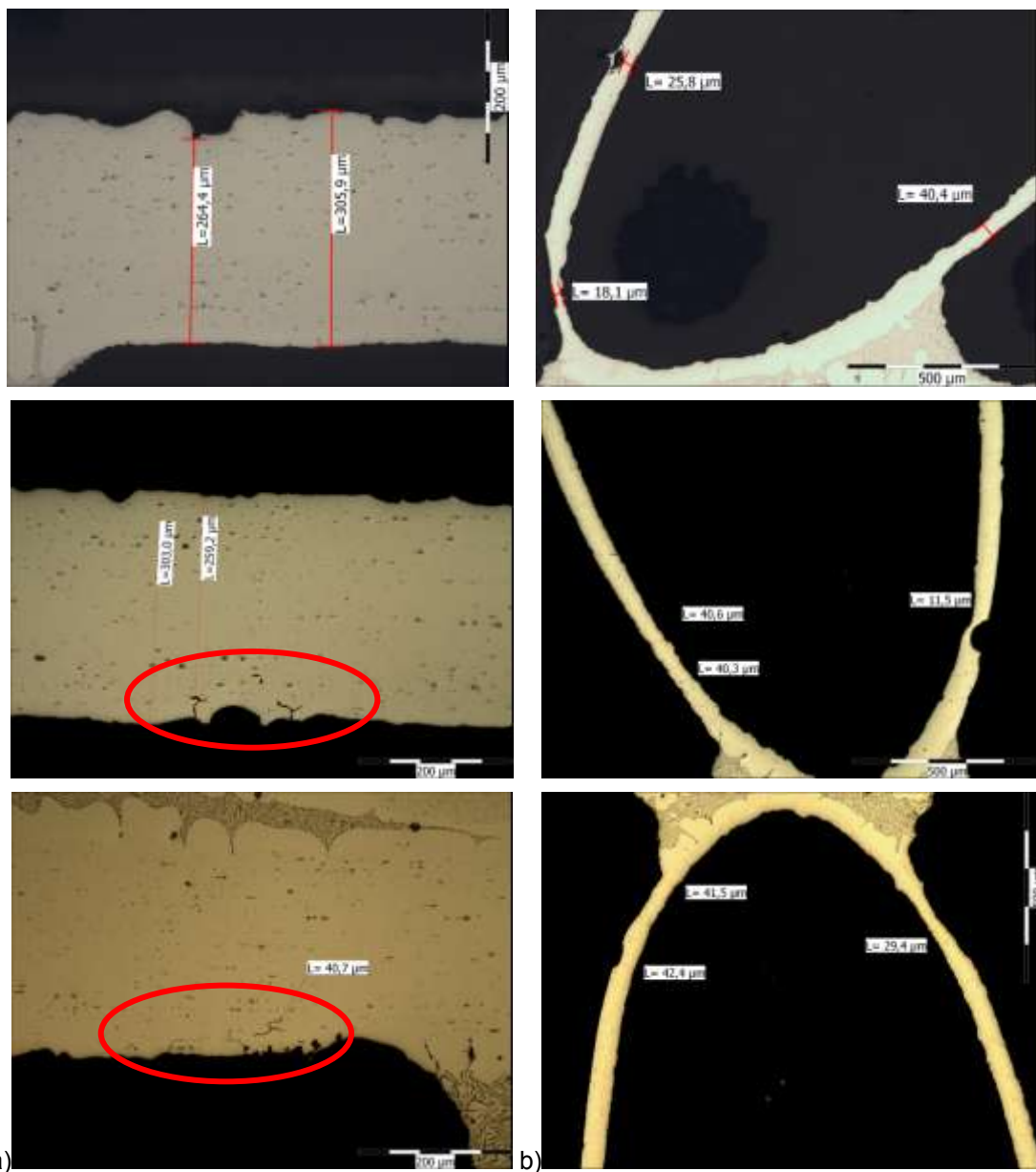
Protože na základě výsledků statického testu II nelze jednoznačně určit materiály, které by vyhověly (případně si počínaly stejně) ve všech kondenzátech, bylo rozhodnuto opakovat test ještě jednou ve 3 prostředích (kondenzáty 1, 2 a 4) s tím, že byly vybrány 4 materiálové kombinace s nejlepšími výsledky statického testu II. U každé materiálové kombinace byly použity 3 vzorky, aby vyhodnocení testu bylo vypovídající a statisticky vyhodnotitelné. Jednalo se o vzorky s označením:

- Materiál Alcan 3916 – 3 vzorky 1.a, 1.b, 1.c
- Materiál Sapa 7873 – 3 vzorky 4.a, 4.b, 4.c
- Materiál Aleris 3527 – 3 vzorky 8.a, 8.b, 8.c
- Materiál Aleris 3542 mod. – 3 vzorky 12.a, 12.b, 12.c

Vlnovce pro vzorky č.1 byly vyrobeny z materiálu 3003 bez přídavku zinku. Vlnovce pro ostatní vzorky již zinek obsahovaly. Jak příprava vzorků, tak i průběh testu byly totožné s předchozím testováním. Rovněž vyhodnocení se provádělo shodným postupem.

6.4.3.1 Vyhodnocení působení 1. kondenzátu v opakovaném statickém testu II

Na následujících obrázcích jsou podle typu materiálu seřazeny vybrané skupiny snímků plátů a vlnovců po opakovaném statickém testu v 1. kondenzátu. Na snímcích níže, viz Obr. 6.4.19, je výběr fotografií vzorků 1.a, 1.b a 1.c zhotovených z materiálu Alcan 3916 s vlnovcem jakosti 3003.



Obr. 6.4.19 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Alcan 3916 a) a vlnovců jakosti 3003 b) testovaných v kondenzátu č.1.

Tab. 6.4.10 Zbytková tloušťka plátů materiálu Alcan 3916 testovaných v kondenzátu č.1 v opakovaném statickém testu II.

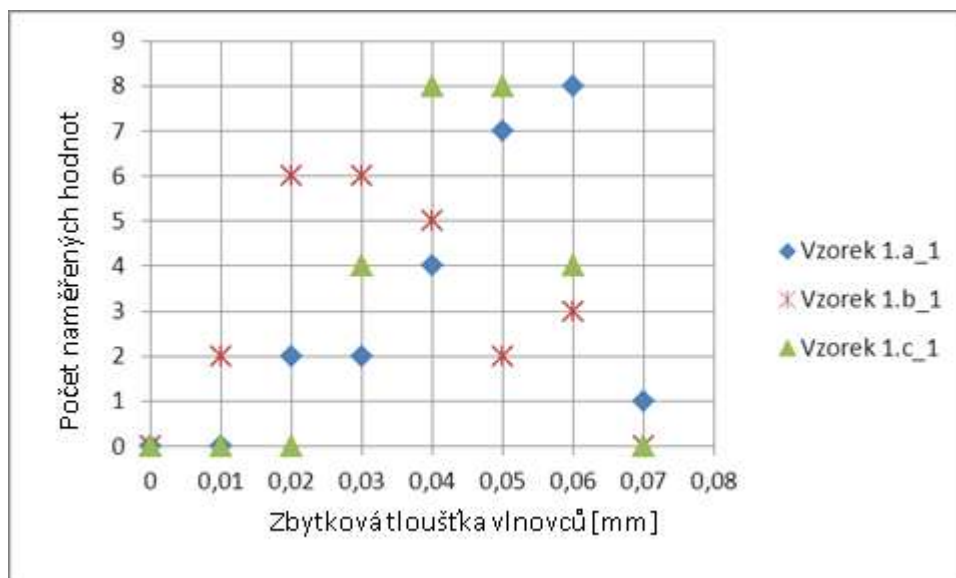
Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]							Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec									
1.a_1	Alcan 3916	3003	0,25	0,28	0,28	0,28	0,26	0,25	0,24	0,35	
1.b_1	Alcan 3916	3003	0,26	0,26	0,27	0,26	0,27	0,28	0,24	0,35	
1.c_1	Alcan 3916	3003	0,25	0,25	0,26	0,25	0,27	0,26	0,24	0,35	

0,26 = MZK

Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 v kombinaci s materiálem plátu Alcan 3916 jsou uvedeny v tabulce, viz *Tab. 6.4.11*. Data jsou pro přehlednost vyneseny i do grafu, kde je zjevné, že zbytková tloušťka vlnovců u vzorků 1.a_1 a 1.c_1 je přibližně stejná, u vzorku 1.b_1 je však zbytková tloušťka menší. Jelikož se jedná o shodné materiály, rozdíl v hodnotách je pak zřejmě způsoben nalezením respektive nenalezením zkorodovaných míst během metalografické přípravy vzorků.

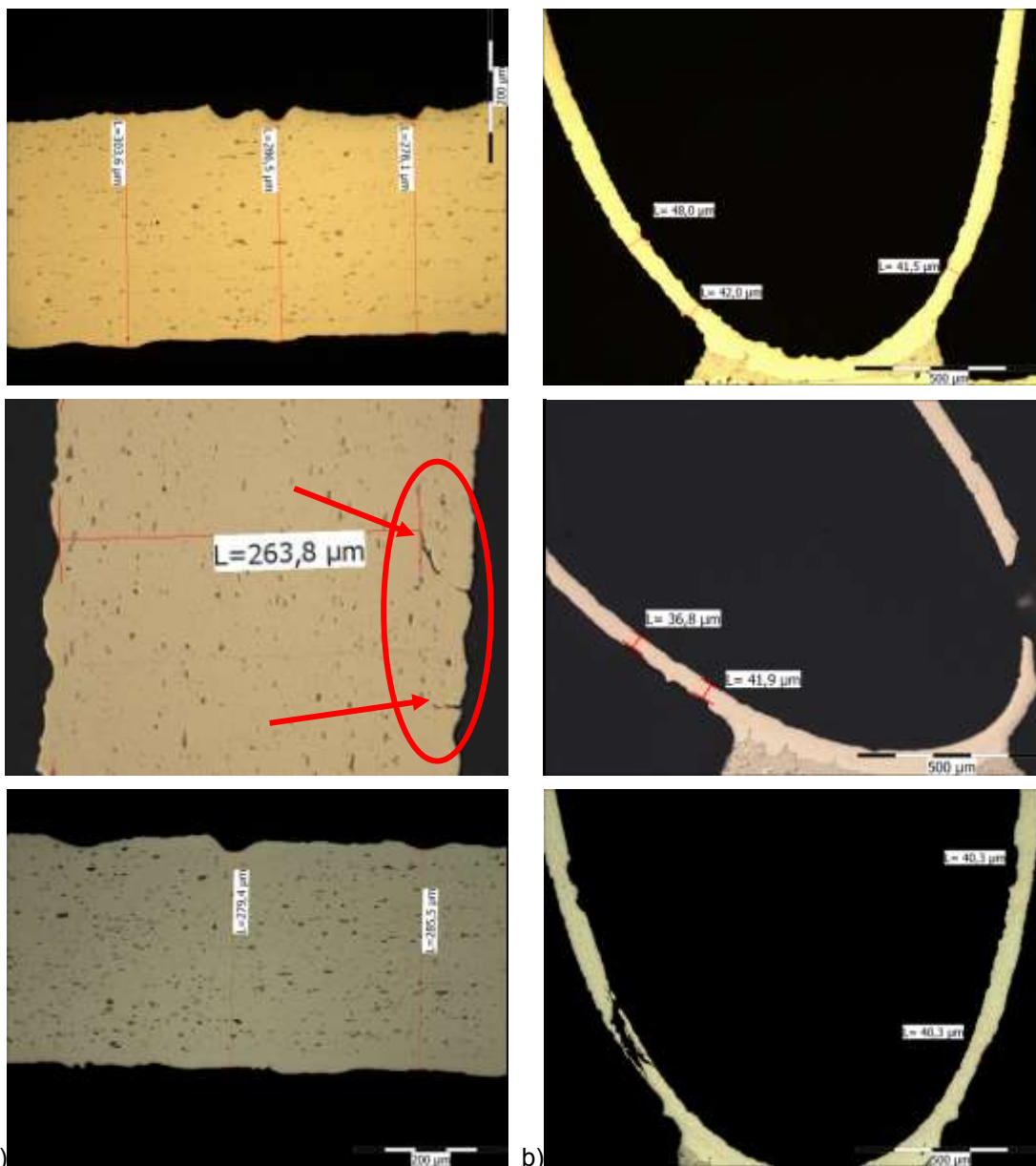
Tab. 6.4.11 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 v kombinaci s materiálem plátu Alcan 3916 testovaných v kondenzátu č. 1.

Vzorek 1.1a [mm]		Vzorek 1.1b [mm]		Vzorek 1.1c [mm]	
0,02	0,04	0,03	0,01	0,06	0,06
0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,06
0,06	0,04	0,03	0,02	0,06	0,06
0,03	0,04	0,02	0,04	0,04	0,06
0,02	0,04	0,03	0,03	0,04	0,06
0,04	0,02	0,03	0,03	0,05	0,07
0,05	0,05	0,04	0,04	0,06	0,05
0,04	0,03	0,02	0,04	0,06	0,06
0,05	0,04	0,02	0,01	0,04	0,06
0,05	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
0,04	0,04	0,01	0,03	0,04	0,04
0,04	0,04	0,01	0,05	0,04	0,04
0,06	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04
0,05	0,05	0,06	0,03	0,03	0,04
0,07	0,05	0,06	0,03	0,05	0,05
0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04
0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,02
0,06	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06
0,06	0,04	0,02	0,05	0,05	0,06
0,06	0,05	0,02	0,02	0,03	0,00
0,06	0,02	0,02	0,01	0,05	0,00
0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05
0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02
0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04



Obr. 6.4.20 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 v kombinaci s materiálem plátu Alcan 3916 testovaných v kondenzátu č.1.

Na snímcích níže, viz Obr. 6.4.21, je výběr fotografií vzorků 4.a, 4.b a 4.c zhotovených z materiálu Sapa 7873 s vlnovcem jakosti 3003 s přídavkem zinku.




Obr. 6.4.21 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Sapa 7873 (a) a vlnovců jakosti 3003+1,5% Zn (b) testovaných v kondenzátu č.1.

Na jednom vzorku v jednom místě byla objevena mezikrystalová koroze plátu, korozní napadení ostatních vzorků bylo povrchové, korozní napadení nepřesáhlo dovolenou maximální hodnotu 30% úbytku tloušťky materiálu. Vlnovce byly místy zkorodovány přes celou tloušťku materiálu, přesto zůstaly celistvé. Hodnoty zbytkové tloušťky plátů materiálu Sapa 7873 jsou uvedeny v tabulce, viz Tab. 6.4.12, kde je červeně vyznačen mezikrystalový průběh koroze daného vzorku.

Tab. 6.4.12 Zbytková tloušťka plátů materiálu Sapa 7873 testovaných v kondenzátu č.1
v opakovaném statickém testu II.

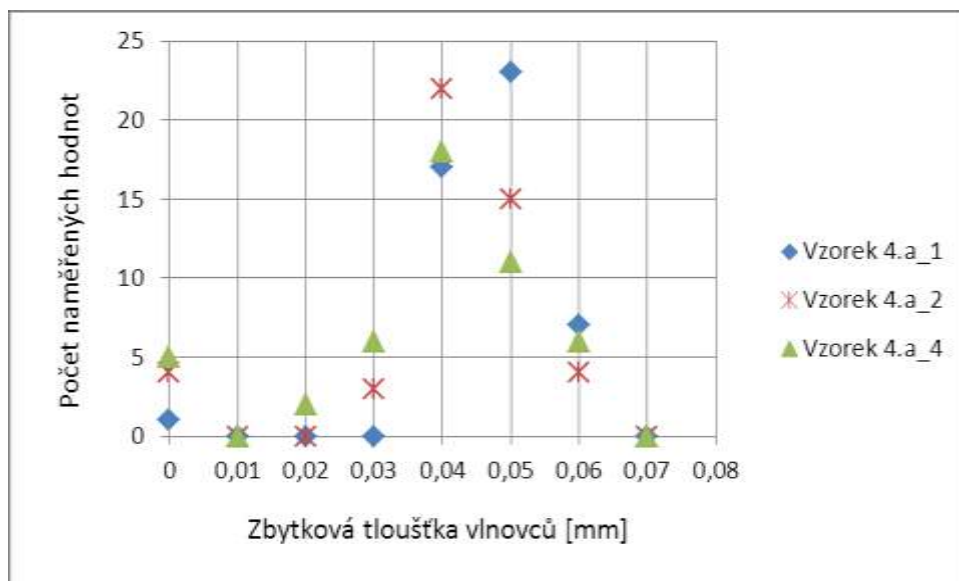
Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]						Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec								
4.a_1	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,28	0,28	0,27	0,29	0,28	0,29	0,23	0,33
4.b_1	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,26	0,26	0,27	0,29	0,26	0,26	0,23	0,33
4.c_1	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,26	0,28	0,27	0,28	0,30	0,27	0,23	0,33

 = MZK

Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Sapa 7873 jsou uvedeny v tabulce, viz Tab. 6.4.13. Data jsou opět pro přehlednost vynesena i do grafu, viz Obr. 6.4.22. Je zřejmé, že zbytková tloušťka vlnovců všech vzorků je přibližně stejná.

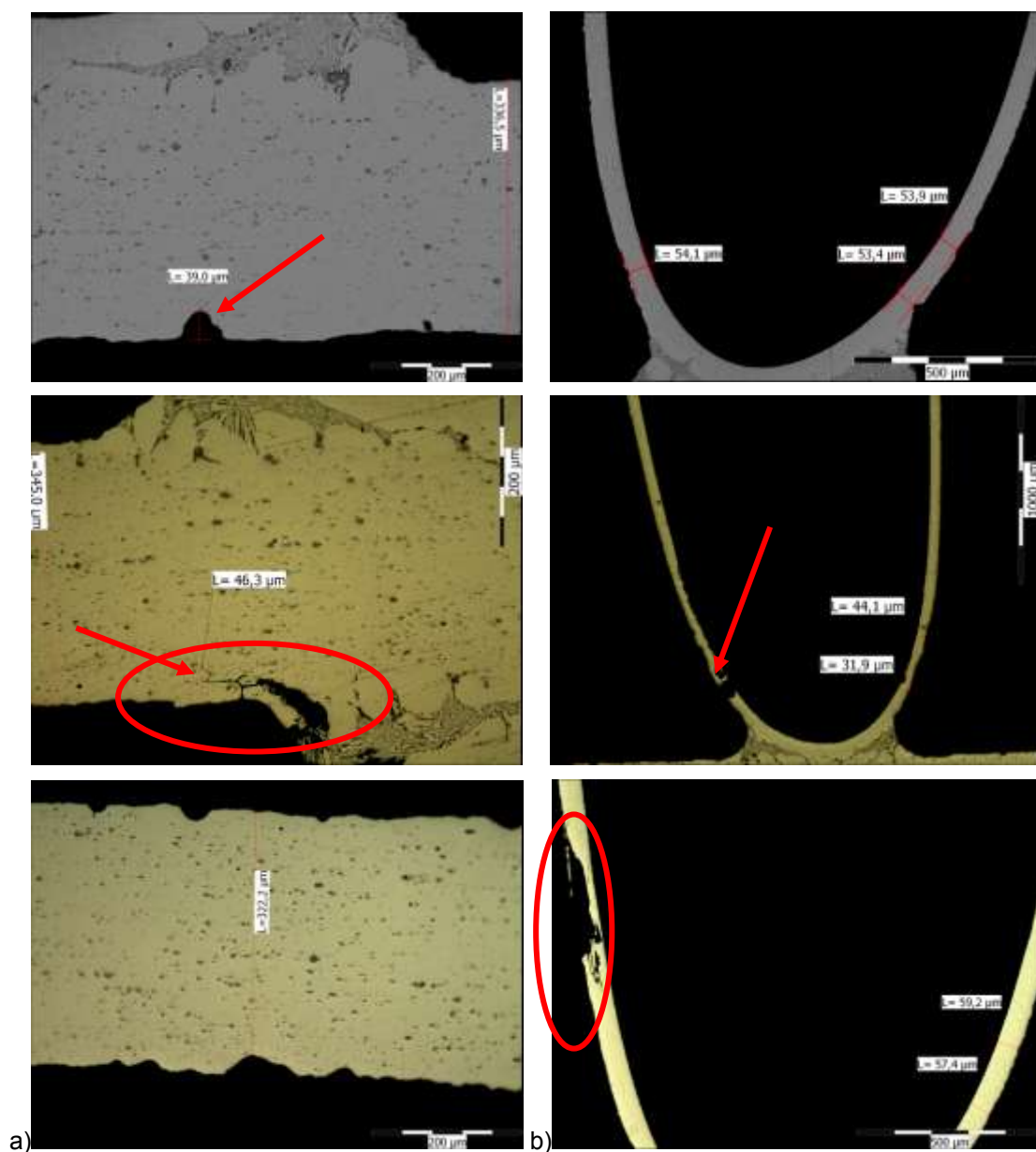
Tab. 6.4.13 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci
s materiálem plátu Sapa 7873 testovaných v kondenzátu č. 1.

Vzorek 4.1a [mm]		Vzorek 4.1b [mm]		Vzorek 4.1c [mm]	
0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04
0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05
0,04	0,04	0,05	0,05	0,02	0,05
0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04
0,04	0,04	0,04	0,05	0,02	0,04
0,04	0,04	0,06	0,05	0,04	0,03
0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0
0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04
0,06	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04
0,05	0,05	0,04	0,03	0,04	0
0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
0,05	0,05	0	0,04	0,03	0,04
0,05	0,06	0	0,04	0,03	0,06
0,04	0,06	0,05	0,04	0,05	0,06
0,04	0,06	0,05	0,04	0,04	0,06
0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,05
0,06	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06
0	0,05	0,06	0,04	0,05	0,06
0,05	0,05	0,04	0,06	0,03	0,05
0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
0,05	0,06	0,03	0,04	0	0,05
0,05	0,06	0,04	0,05	0	0
0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
0,05	0,05	0	0	0,05	0,06



Obr. 6.4.22 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Sapa 7873 testovaných v kondenzátu č.1.

Následující snímky znázorňují korozní napadení vzorků č. 8.a, 8.b a 8.c zhotovených z materiálu plátu Aleris 3527 a vlnovce jakosti 3003 s přidavkem zinku.




Obr. 6.4.23 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Aleris 3527 a) a vlnovce jakosti 3003+1,5% Zn b) testovaných v kondenzátu č.1.

Stejně jako u předchozího vzorku č.4 bylo i u materiálu Aleris 3527 nalezeno jediné místo s mezikrystalovým napadením, viz Obr. 6.4.23, ani v tomto případě nepřesáhla koroze povolenou hloubku 30% tloušťky materiálu, ostatním druhem napadení byly jen mělké důlky na povrchu plátu. Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky plátů materiálu Aleris 3527 jsou uvedeny v tabulce, viz Tab. 6.4.14. Naměřená hodnota s mezikrystalovou korozí je vyznačena v tabulce červeně.

Tab. 6.4.14 Zbytková tloušťka plátů materiálu Aleris 3527 testovaných v kondenzátu č.1
v opakovaném statickém testu II.

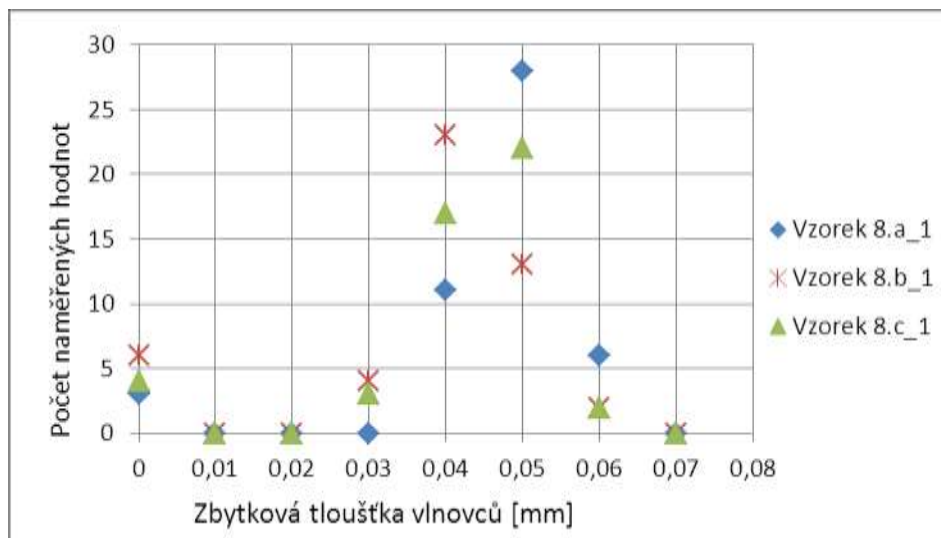
Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]						Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec								
8.a_1	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,31	0,32	0,30	0,31	0,32	0,33	0,27	0,39
8.b_1	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,30	0,30	0,30	0,31	0,32	0,32	0,27	0,39
8.c_1	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,32	0,32	0,32	0,32	0,31	0,32	0,27	0,39

 = MZK

Níže, viz Tab. 6.4.15, jsou uvedeny naměřené hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přídatkem zinku. Hodnoty jsou opět vyneseny do grafu, viz Obr. 6.4.24, z něhož lze vyčíst, že korozní napadení vlnovců u všech tří vzorků bylo velmi podobné, místy byly vlnovce zkorodovány skrz celou tloušťku materiálu. Druhem korozního napadení byla převážně mezikrystalová koroze.

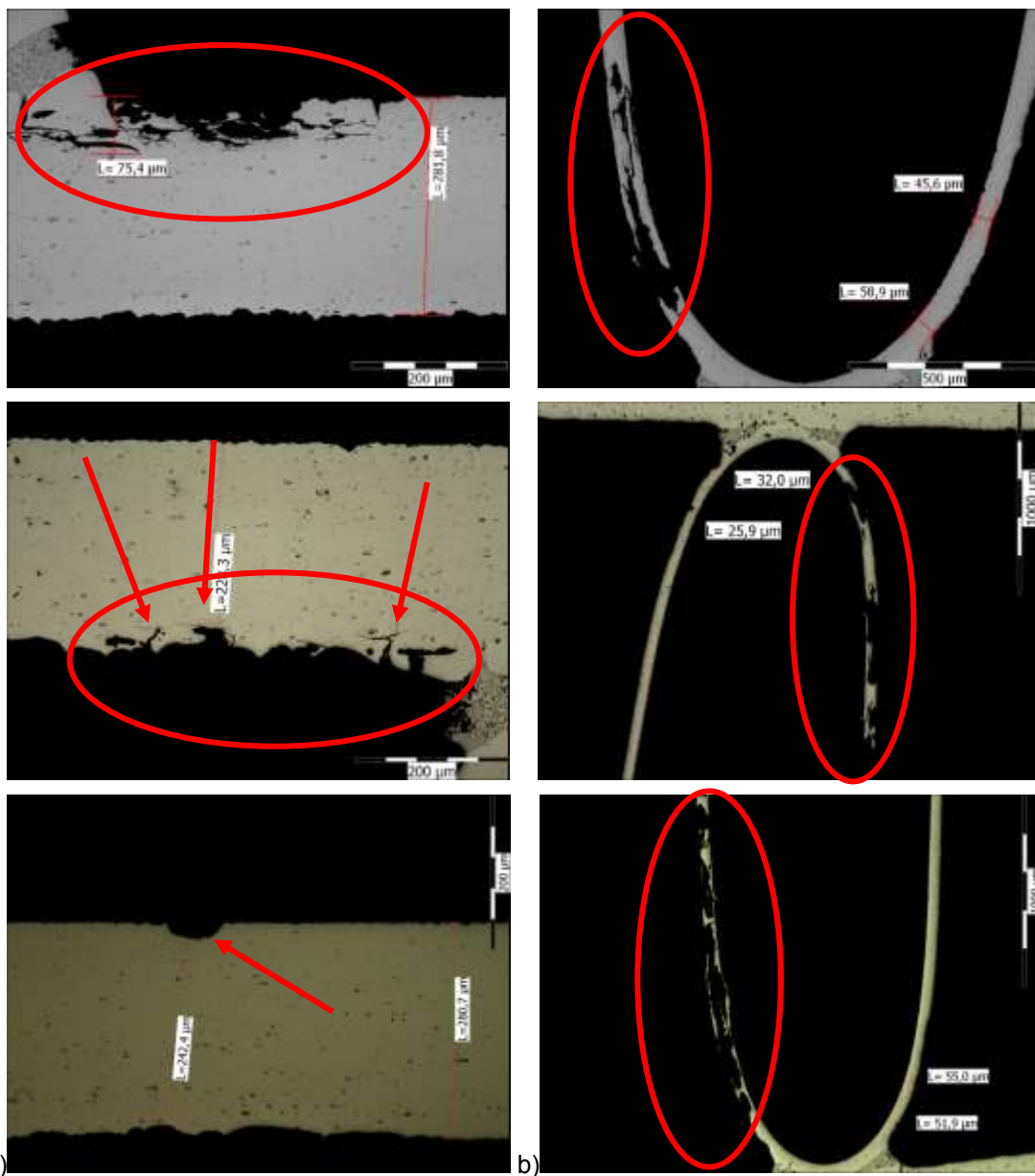
Tab. 6.4.15 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přídatkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Aleris 3527 testovaných v kondenzátu č.1.

Vzorek 8.1a [mm]		Vzorek 8.1b [mm]		Vzorek 8.1c [mm]	
0,04	0,05	0,05	0,04	0,06	0,05
0,05	0,05	0	0,04	0,06	0,04
0,04	0,06	0,04	0,04	0	0,05
0,05	0,05	0,03	0	0,05	0,05
0,05	0,06	0,04	0,03	0,05	0,04
0,05	0,06	0	0,04	0,05	0,04
0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05
0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
0,06	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05
0,05	0,06	0,04	0,03	0,05	0,04
0,05	0,05	0,04	0,03	0,05	0,04
0,05	0,05	0,04	0	0,05	0,05
0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,04
0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,03
0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0
0,04	0,05	0,05	0,04	0	0,05
0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04
0,05	0,04	0,05	0,06	0,05	0,04
0,05	0,04	0	0,05	0,04	0,05
0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04
0,05	0	0,04	0,06	0,04	0,05
0,05	0	0,04	0,05	0,03	0,05
0,05	0	0	0,05	0,05	0



Obr. 6.4.24 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Aleris 3527 testovaných v kondenzátu č. 1.

Následující vybrané snímky, viz Obr. 6.4.25, znázorňují korozní napadení vzorků č. 12.a, 12.b a 12.c vyrobené z materiálů plátů Aleris 3542 a vlnovce jakosti 3003 s přidavkem zinku testované v 1. kondenzátu.




Obr. 6.4.25 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Aleris 3542 a) a vlnovce jakosti 3003+1,5% Zn b) testovaných v kondenzátu č.1.

Převažujícím typem napadení plátů slitiny Aleris 3542 byly mělké důlky a povrchová koroze, na dvou místech byla zjištěna mezikrystalová koroze. Ta se objevovala zejména u vlnovců. Hodnoty naměřených zbytkové tloušťky plátů materiálu Aleris 3542 jsou uvedeny níže, viz Tab. 6.4.16, červené zvýraznění opět označuje mezikrystalový průběh korozního napadení.

Tab. 6.4.16 Zbytková tloušťka plátů materiálu Aleris 3542 testovaných v kondenzátu č. 1
v opakovaném statickém testu II.

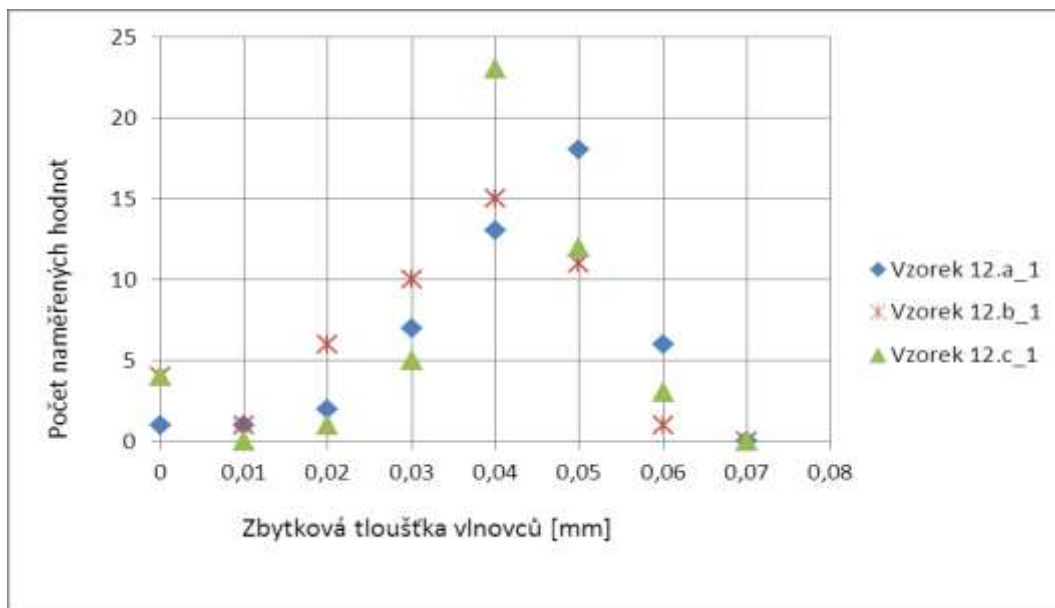
Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]						Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec								
12.a_1	Aleris 3542	3003+1,5%Zn	0,27	0,25	0,26	0,21	0,23	0,25	0,21	0,30
12.b_1	Aleris 3542	3003+1,5%Zn	0,23	0,24	0,26	0,27	0,26	0,28	0,21	0,30
12.c_1	Aleris 3542	3003+1,5%Zn	0,24	0,26	0,25	0,26	0,26	0,27	0,21	0,30

 = MZK

Následující tabulka, viz Tab. 6.4.7, poskytuje hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přídavkem zinku. Grafické znázornění těchto hodnot opět ukazuje na shodné výsledky, tedy že působení kondenzátu č.1 na všechny vzorky bylo stejné.

Tab. 6.4.17 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přídavkem zinku v kombinaci
s materiálem plátu Aleris 3542 testovaných v kondenzátu č. 1.

Vzorek 12.1a [mm]		Vzorek 12.1b [mm]		Vzorek 12.1c [mm]	
0,05	0,04	0,04	0,03	0	0,04
0,05	0,03	0,03	0,04	0,06	0,05
0,06	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04
0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,05
0,05	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04
0,06	0,03	0,04	0,05	0,04	0,05
0,05	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05
0,05	0,03	0,02	0,02	0,05	0,05
0,05	0,04	0,03	0	0,05	0,05
0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,06
0,06	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
0,06	0,04	0,03	0,04	0,04	0,05
0,01	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
0,05	0,05	0,01	0,03	0,03	0,04
0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05
0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0
0,02	0,05	0,04	0,05	0,04	0
0,03	0,05	0,05	0,05	0,03	0
0,04	0,04	0	0,04	0,04	0,03
0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,04
0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04
0,04	0,05	0	0,02	0,04	0,03
0,04	0,06	0	0,02	0,04	0,04
0,02	0	0,03	0,05	0,04	0,04



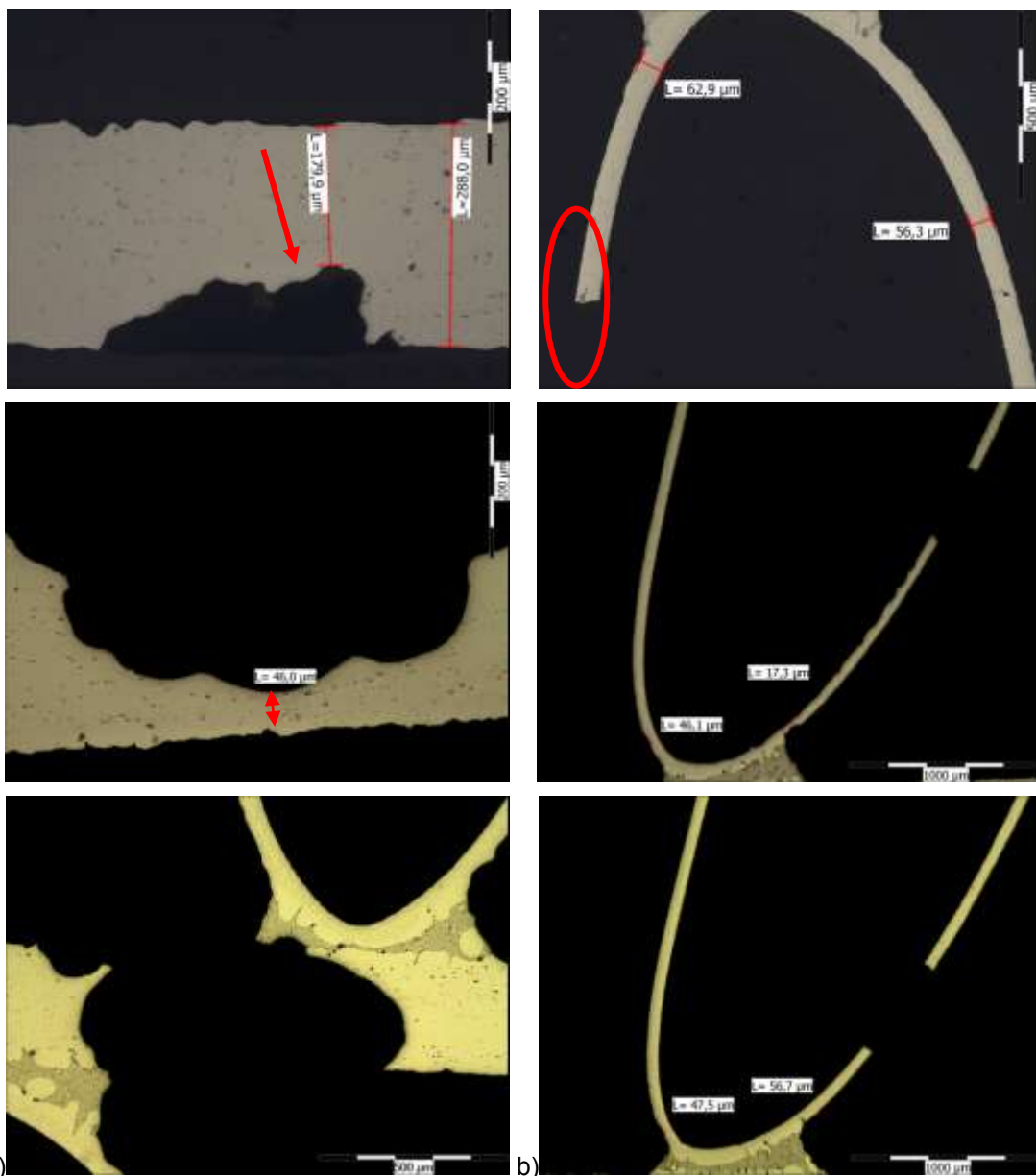
Obr. 6.4.26 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Aleris 3542 testovaných v kondenzátu č.1.

Vyhodnocení výsledků opakovaného testu v kondenzátu č.1 lze shrnout následovně:

- U všech vzorků se projevilo mezikrystalové napadení plátů. Podle stanovených podmínek, kdy je mezikrystalová koroze nežádoucí, žádný materiál nevyhověl.
- Nejčastějším typem napadení plátů byla důlková koroze.
- Nejčastějším typem napadení vlnovců byla mezikrystalová koroze.
- Vlnovce u všech vzorků, s výjimkou vzorku 1.b, vykazovaly shodné úbytky materiálu.

6.4.3.2 Vyhodnocení působení 2.kondenzátu v opakovaném statickém testu II

Na následujících obrázcích jsou opět podle typu materiálu seřazeny vybrané skupiny snímků plátů a vlnovců po opakovaném statickém testu v 2. kondenzátu. Na Obr. 6.4.27 je výběr fotografií vzorků 1.a, 1.b a 1.c zhotovených z materiálu Alcan 3916 s vlnovcem jakosti 3003.



Obr. 6.4.27 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Alcan 3916 a) a vlnovců jakosti 3003, b) testovaných v kondenzátu č.2.

Na uvedených snímcích je zřejmé výrazné napadení plátů vedoucí dokonce k perforaci plátu materiálu Alcan 3916. Povrch plátu byl napaden důlky přesahujícím povolený limit 30% původní tloušťky materiálu. Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky plátů jsou uvedeny níže, viz Tab. 6.4.18, červené zvýraznění označuje mezikrystalovou korozi, žluté pak úbytek tloušťky materiálu větší než 30%.

Tab. 6.4.18 Zbytková tloušťka plátů materiálu Alcan 3916 testovaných v kondenzátu č.2
v opakovaném statickém testu II.

Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]							Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec									
1.a_2	Alcan 3916	3003	0,27	0,28	0,27	0,18	0,28	0,26	0,24	0,35	
1.b_2	Alcan 3916	3003	0,23	0,15	0,28	0,25	0,03	0,28	0,24	0,35	
1.c_2	Alcan 3916	3003	0	0,2	0,27	0	0,2	0,28	0,24	0,35	

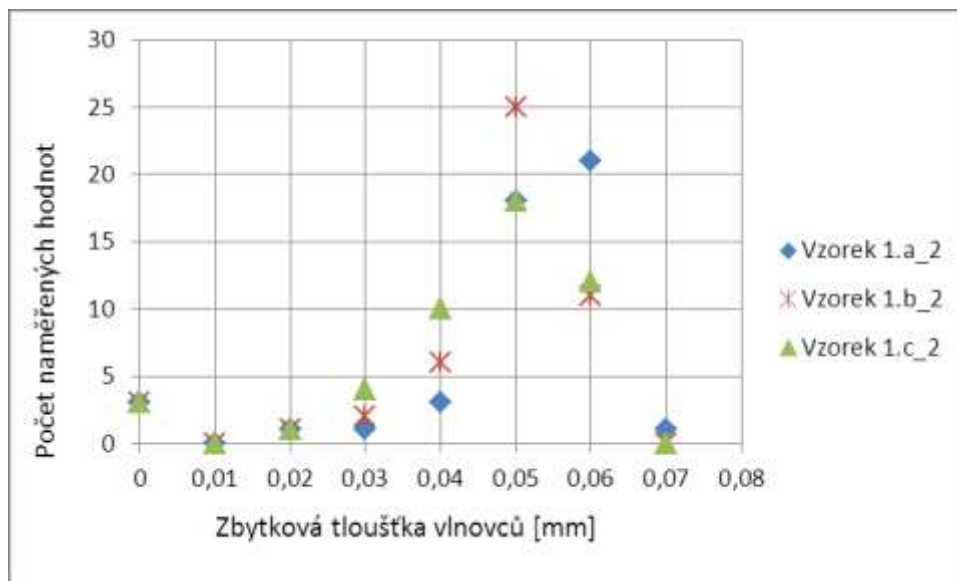
= MZK

= úbytek >30%

V následující tabulce, viz Tab. 6.4.19, jsou uvedeny naměřené hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců slitiny jakosti 3003 vzorků 1.a, 1.b a 1.c. Pro přehlednost jsou naměřená data vynesena v grafu, viz Obr. 6.4.28, kde lze vidět, že korozní napadení vlnovců všech tří vzorků bylo podobné. Druhem korozního napadení vlnovců byla převážně mezikrystalová koroze.

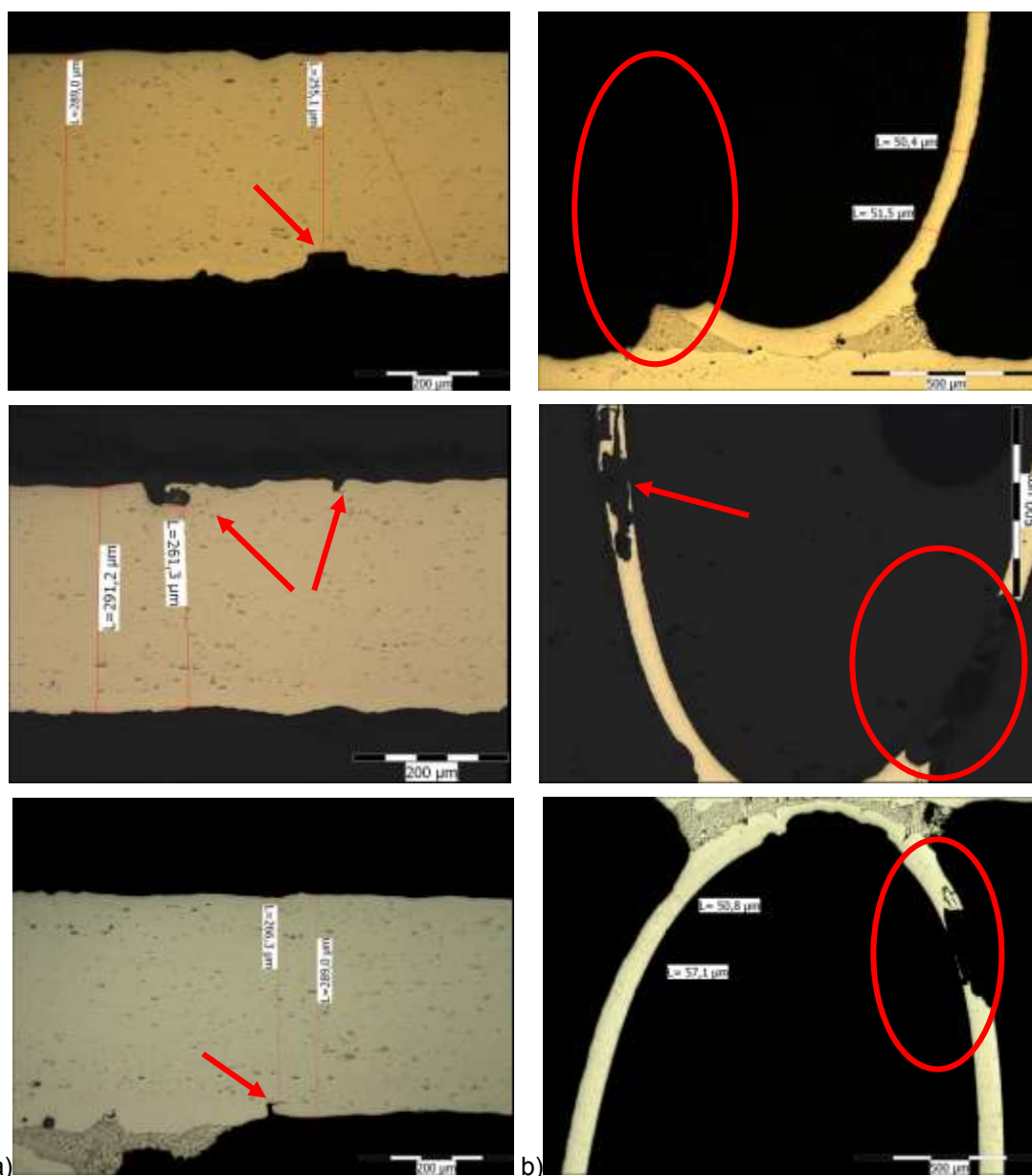
Tab. 6.4.19 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 v kombinaci s materiálem plátu Alcan 3916 testovaných v kondenzátu č.2.

Vzorek 1.a2 [mm]		Vzorek 1.b2 [mm]		Vzorek 1.c2 [mm]	
0,05	0,06	0,05	0,05	0,04	0,05
0,05	0,05	0,04	0,04	0	0,05
0,05	0,06	0,04	0,05	0	0,04
0	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06
0	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05
0,05	0,06	0,03	0,05	0	0,05
0,04	0,06	0,02	0,06	0,03	0,04
0,03	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
0,05	0,05	0	0,05	0,04	0,04
0,04	0,06	0	0,06	0,03	0,05
0,04	0,06	0,05	0,05	0,02	0,05
0,02	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03
0,06	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05
0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05
0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06
0,06	0,05	0,05	0,03	0,06	0,06
0,06	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05
0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06
0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,03
0	0,06	0	0,06	0,05	0,04
0,06	0,05	0,04	0,06	0,06	0,04
0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04



Obr. 6.4.28 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 v kombinaci s materiálem plátu Alcan 3916 testovaných v kondenzátu č.2.

Následující snímky znázorňují korozní napadení vzorků materiálu Sapa 7873 v kombinaci s vlnovcem jakosti 3003 s přídavkem zinku.




Obr. 6.4.29 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Sapa 7873 (a) a vlnovců jakosti 3003+1,5% Zn (b) testovaných v kondenzátu č.2.

Na Obr. 6.4.29 je zřejmé mezikrystalové i důlkové napadení plátů, ovšem napadení nepřesahovalo 30% povolený úbytek původní tloušťky. Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky plátů jsou uvedeny níže, viz Tab. 6.4.20, červené zvýraznění znamená mezikrystalové napadení materiálu. Vlnovce korodovaly mezikrystalově, často docházelo k prokorodování skrz celou tloušťku vlnovce.

Tab. 6.4.20 Zbytková tloušťka plátů materiálu Sapa 7873 testovaných v kondenzátu č.2
v opakovaném statickém testu II.

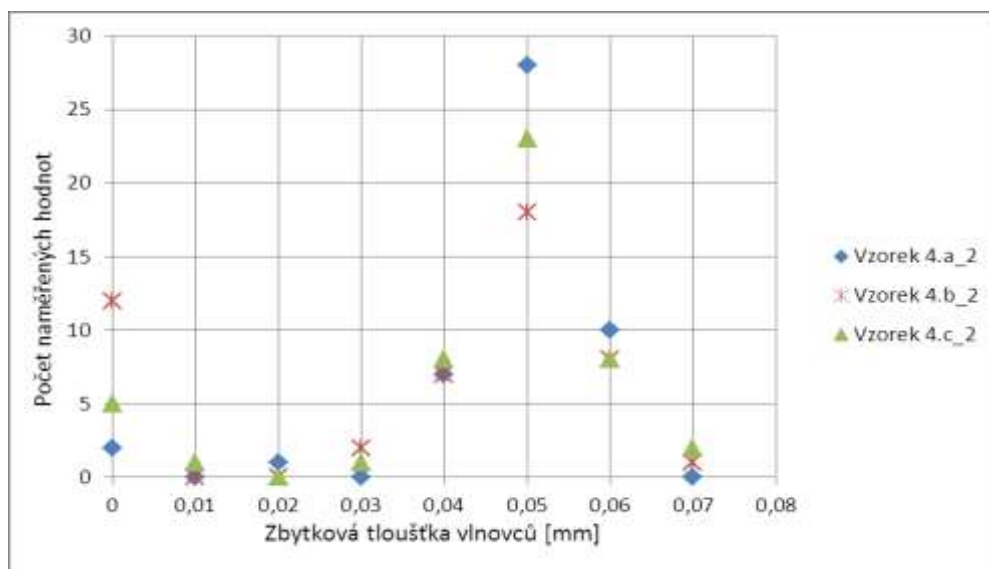
Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]						Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec								
4.a_2	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,27	0,28	0,27	0,26	0,28	0,28	0,23	0,33
4.b_2	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,27	0,27	0,27	0,26	0,28	0,24	0,23	0,33
4.c_2	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,26	0,27	0,28	0,27	0,28	0,27	0,23	0,33

 = MZK

V následující tabulce, viz Tab. 6.4.21, jsou uvedeny hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přídavkem zinku. Jejich grafické zobrazení, viz Obr. 6.4.30, jasně ukazuje podobný úbytek u vzorků 4.a a 4.c, u vzorku 4.b docházelo častěji k úplnému prokorodování vlnovců.

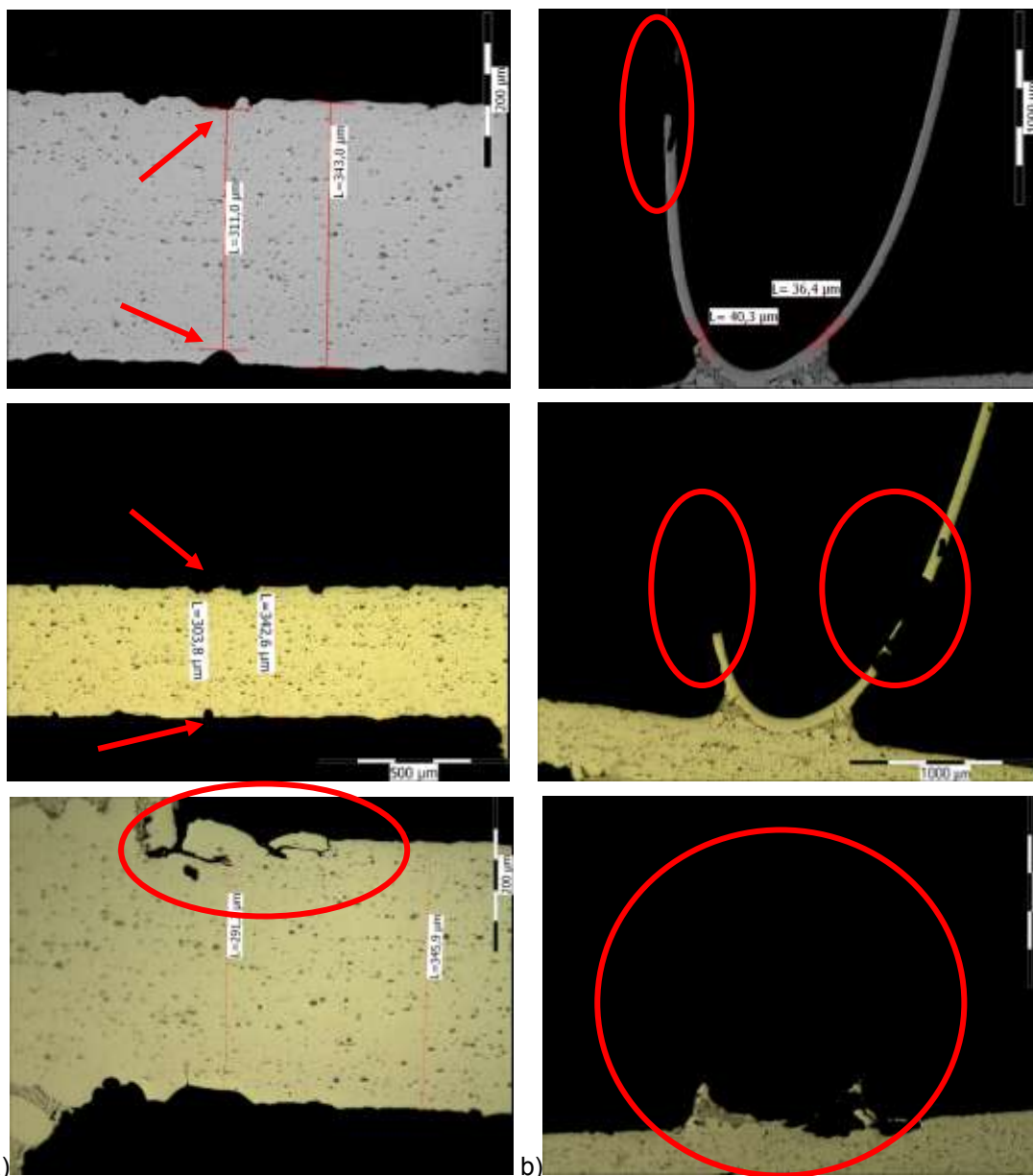
Tab. 6.4.21 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přídavkem zinku v kombinaci
s materiálem plátu Sapa 7873 testovaných v kondenzátu č.2.

Vzorek 4.a2 [mm]		Vzorek 4.b2 [mm]		Vzorek 4.c2 [mm]	
0	0,05	0,06	0,05	0,04	0,05
0,05	0,05	0,05	0,03	0,05	0,01
0	0,05	0,05	0	0,04	0,05
0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05
0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
0,04	0,05	0	0,04	0,05	0,05
0,06	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04
0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04
0,04	0,05	0,04	0,03	0,05	0,05
0,05	0,05	0	0	0,04	0
0,05	0,05	0,05	0	0,05	0,06
0,05	0,06	0,05	0	0,05	0,06
0,05	0,05	0,04	0,06	0,05	0,05
0,02	0,05	0,04	0,06	0,07	0,06
0,05	0,06	0,05	0,07	0,06	0
0,04	0,05	0	0,05	0,04	0,05
0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
0,06	0,04	0,05	0,05	0	0,05
0,04	0,05	0,06	0,05	0,03	0,05
0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
0,06	0,05	0,06	0,06	0	0,05
0,05	0,06	0	0	0,05	0,06
0,06	0,05	0,05	0	0,05	0,07
0,06	0,05	0	0	0	0,06



Obr. 6.4.30 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnoců jakosti 3003 s přídavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Sapa 7873 testovaných v kondenzátu č.2.

Na následujících obrázcích je výběr ze snímků vzorků složených z materiálů plátů Aleris 3527 a vlnovce jakosti 3003 s přídavkem zinku testovaných v 2. kondenzátu.



Obr. 6.4.31 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Aleris 3527 a) a vlnovce jakosti 3003+1,5% Zn b) testovaných v kondenzátu č.2.

Koroze plátů se projevowała mezikrystalicky případně tvorbou důlků, které kromě jednoho nepřesahovaly limitní hodnotu 30% úbytku tloušťky materiálu. Vlnovce byly silně degradovány, místy úplně zkorodovaly, viz Obr. 6.4.31. Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky plátů jsou uvedeny níže, viz Tab. 6.4.22, červené zvýraznění označuje mezikrystalový průběh koroze, oranžově je označen úbytek tloušťky větší než 30%.

Tab. 6.4.22 Zbytková tloušťka plátů materiálu Aleris 3527 testovaných v kondenzátu č.2
v opakovaném statickém testu II.

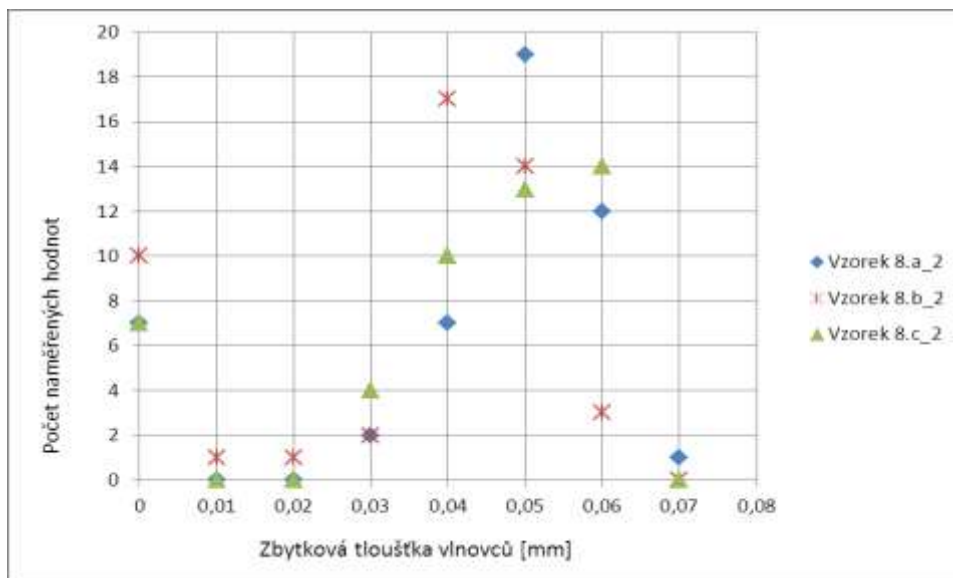
Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]						Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec								
8.a_2	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,31	0,31	0,33	0,31	0,32	0,28	0,27	0,39
8.b_2	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,31	0,31	0,30	0,32	0,30	0,32	0,27	0,39
8.c_2	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,31	0,29	0,25	0,30	0,29	0,33	0,27	0,39

 = MZK	 = úbytek >30%
---	---

V tabulce, viz Tab. 6.4.23, jsou uvedeny hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců, nulové hodnoty znamenají úplné zkorodování vlnovců. Grafické znázornění těchto hodnot ukazuje podobné korozní napadení vlnovců u všech tří vzorků.

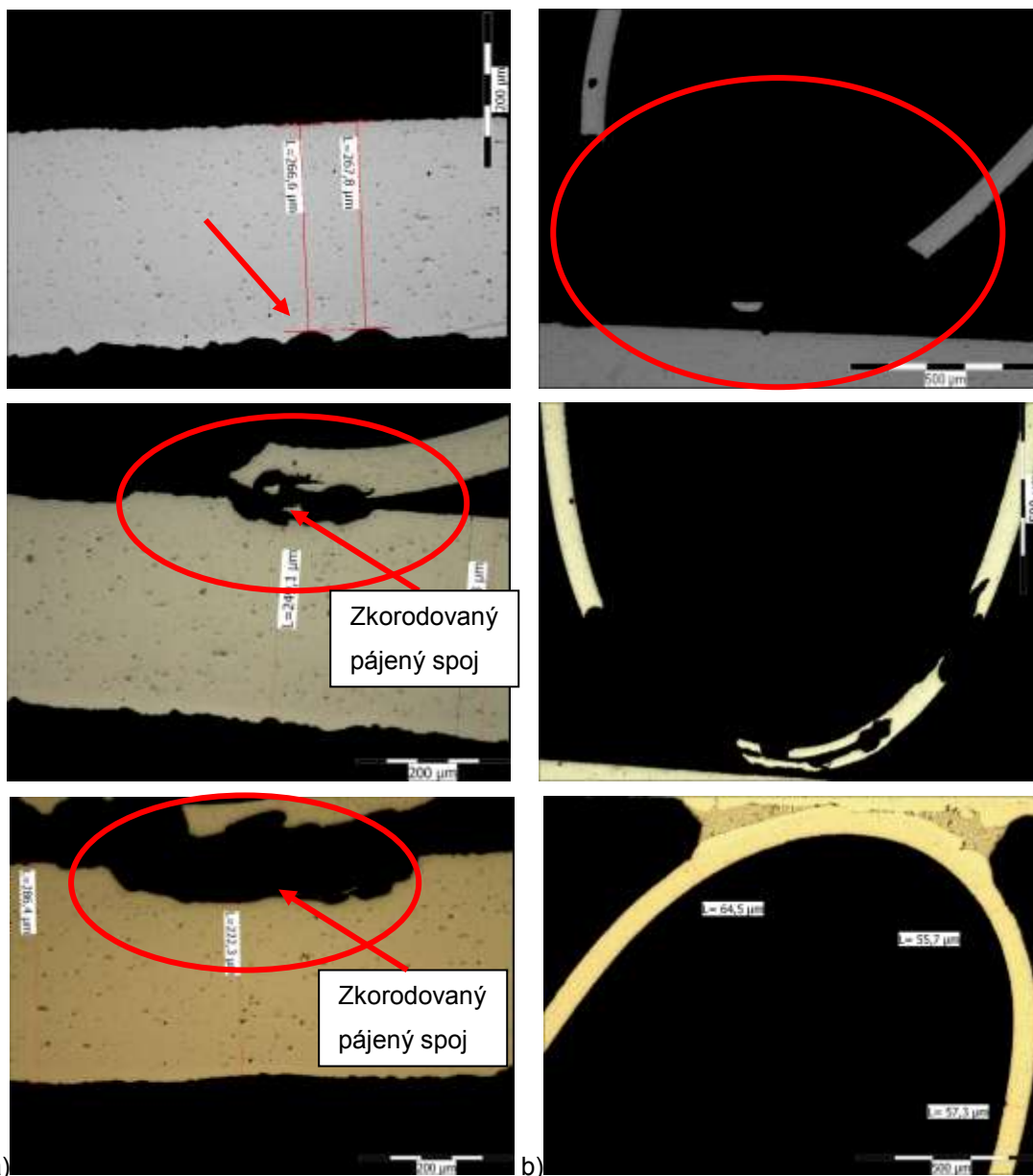
Tab. 6.4.23 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Aleris 3527 testovaných v kondenzátu č.2.

Vzorek 8.2a [mm]		Vzorek 8.2b [mm]		Vzorek 8.2c [mm]	
0	0	0,04	0,04	0,05	0,05
0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04
0,04	0,04	0,04	0,02	0,05	0
0,05	0	0,04	0,04	0,05	0,06
0,05	0,06	0,04	0,04	0,04	0,06
0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,05
0	0,06	0,04	0,05	0	0,06
0	0,06	0,04	0,04	0	0,06
0	0,05	0,05	0,04	0	0,05
0,04	0,05	0,05	0	0,05	0
0	0,05	0,05	0	0,04	0
0,05	0,05	0,04	0	0,04	0,06
0,05	0,06	0,04	0	0,05	0,05
0,06	0,05	0	0,04	0,03	0,06
0,05	0,06	0,05	0	0,04	0,06
0,06	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04
0,03	0,04	0,05	0,05	0,03	0,06
0,03	0,05	0	0,05	0,03	0,06
0,05	0,07	0,04	0	0	0,05
0,04	0,05	0,03	0,06	0,06	0,06
0,06	0,06	0	0,06	0,06	0,06
0,06	0,05	0	0,05	0,06	0,05
0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
0,06	0,06	0,01	0,04	0,05	0,04



Obr. 6.4.32 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přídavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Aleris 3527 testovaných v kondenzátu č.2.

Poslední série snímků vzorků testovaných v 2. kondenzátu složených z materiálů plátů Aleris 3542 a vlnovců jakosti 3003 jsou na následujících snímcích, viz Obr. 6.4.33.



Obr. 6.4.33 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Aleris 3542 a) a vlnovce jakosti 3003+1,5% Zn b) testovaných v kondenzátu č.2.

Mechanismem napadení plátů byla důlková koroze, která nepřesáhla stanovenou 30% hranici úbytku tloušťky materiálu, mezikrystalové napadení nebylo nalezeno ani na jednom vzorku, viz Tab. 6.4.24. Ovšem oproti ostatním testovaným vzorkům v 2.kondenzátu byly silně napadeny pájené spoje, což vedlo až k uvolnění vlnovců. Vlnovce byly napadeny mezikrystalovou korozí, která často vedla k úplné degradaci materiálu vlnovce.

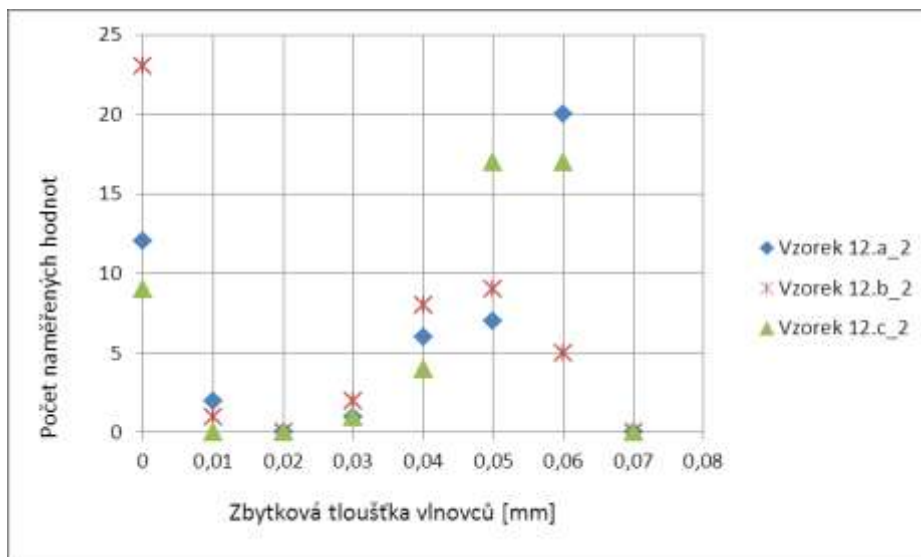
*Tab. 6.4.24 Zbytková tloušťka plátů materiálu Aleris 3542 testovaných v kondenzátu č.2
v opakovaném statickém testu II.*

Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]						Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec								
12.a_2	Aleris 3542	3003+1,5%Zn	0,24	0,24	0,26	0,27	0,25	0,27	0,21	0,30
12.b_2	Aleris 3542	3003+1,5%Zn	0,26	0,26	0,28	0,24	0,25	0,27	0,21	0,30
12.c_2	Aleris 3542	3003+1,5%Zn	0,22	0,26	0,26	0,25	0,27	0,27	0,21	0,30

V tabulce níže, viz *Tab. 6.4.25*, jsou naměřené hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců, je zřejmé, že často docházelo k úplné degradaci (hodnoty 0), nejvíce zkorodované vlnovce, či úplně chybějící, byly u vzorku 12.b, což mohlo být také způsobeno korozí pájeného spoje a následným uvolněním vlnovců. Naměřená data jsou graficky srovnána, viz *Obr. 6.4.34*.

*Tab. 6.4.25 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci
s materiálem plátu Aleris 3542 testovaných v kondenzátu č.2.*

Vzorek 12.2a [mm]		Vzorek 12.2b [mm]		Vzorek 12.2c [mm]	
0	0,06	0,01	0	0,06	0,05
0,06	0,06	0,03	0	0,06	0,06
0,06	0,06	0,04	0	0,06	0,06
0,06	0	0	0	0,06	0,06
0,06	0	0	0	0,06	0,06
0,06	0	0	0,04	0,06	0,05
0	0,06	0	0	0	0
0	0	0,06	0	0	0
0	0,06	0,06	0,04	0	0
0	0,06	0	0	0	0,06
0,01	0,06	0	0	0	0,03
0,06	0,06	0	0	0	0,05
0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05
0	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05
0,06	0,05	0	0	0,05	0,04
0	0,04	0,04	0	0,06	0,05
0,06	0,01	0,05	0,05	0,06	0,04
0,05	0	0,06	0,05	0,06	0,05
0,05	0,04	0,03	0,05	0,06	0,05
0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	0,05
0,06	0,05	0,04	0	0,05	0,04
0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
0,03	0,04	0,04	0,06	0,05	0,05
0,05	0,06	0	0	0,05	0,05



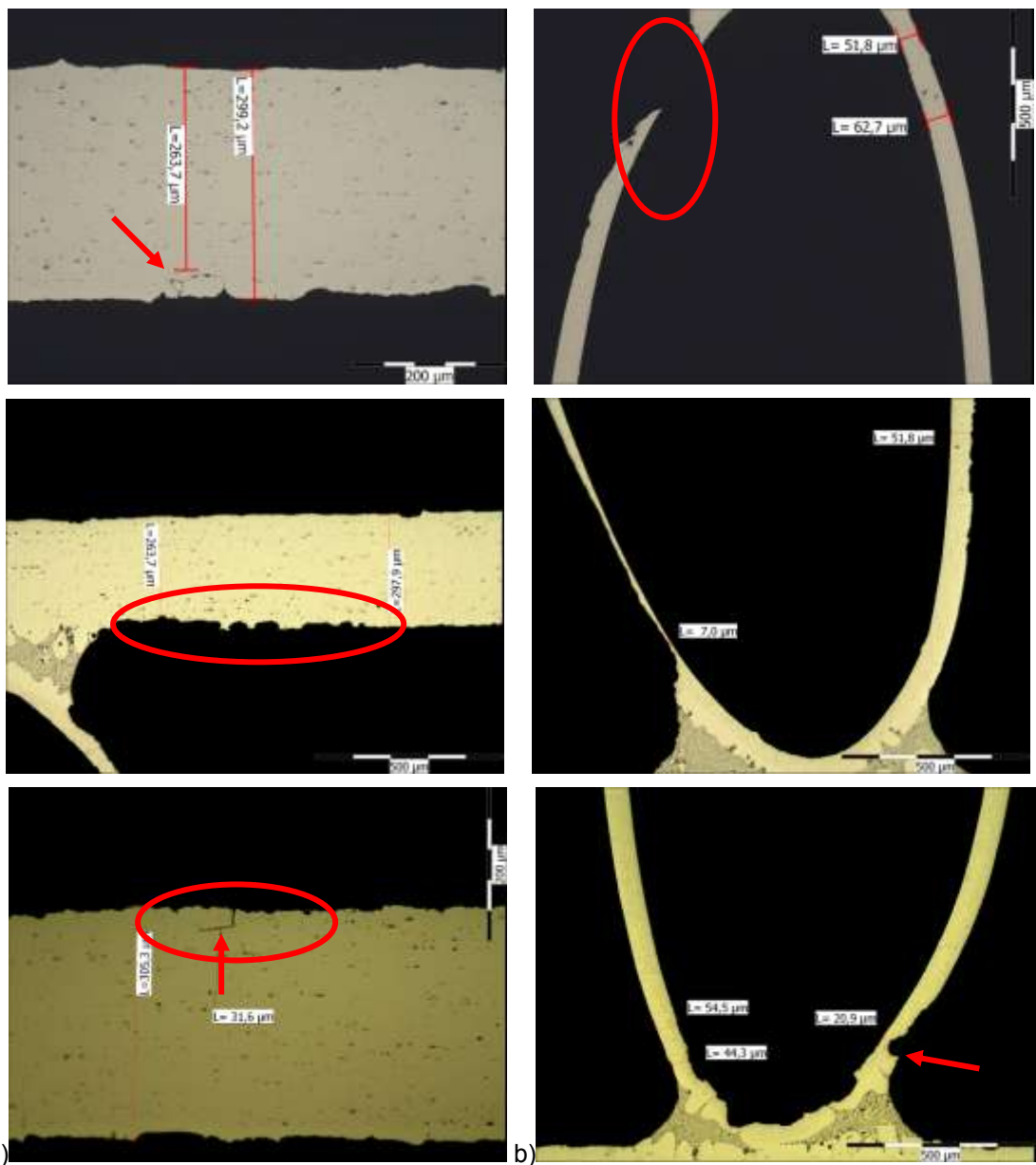
Obr. 6.4.34 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Aleris 3542 testovaných v kondenzátu č.2.

Vyhodnocení výsledků opakovaného testu v kondenzátu č.2 přineslo následující závěry:

- U vzorků č.1 (Alcan 3916), č.4 (Sapa 7873) a č.8 (Aleris 3527) se projevilo mezikrystalové napadení plátů a protože je mezikrystalová koroze nežádoucí, žádný z těchto materiálů nevyhověl.
- Vzorek č.12 vyrobený z materiálu plátu Aleris 3542 byl napaden důlkovou korozí, která nepřesáhla maximální povolený úbytek materiálu 30%, materiál plátu Aleris 3542 tedy jako jediný testu vyhověl. Kdežto vlnovec v této materiálové kombinaci byl často úplně degradován, což lze vysvětlit anodickým obětováním vlnovce a tedy ochranou plátu.
- Nejčastějším typem napadení plátů byla důlková koroze.
- Nejčastějším typem napadení vlnovců byla mezikrystalová koroze. Nejvíce degradován byl vlnovec jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem 3542.
- Vlnovce u všech vzorků s výjimkou materiálu jakosti 3003 bez zinku vykazovaly značné úbytky materiálu, vedoucí často k úplné degradaci.
- Pájené spoje vzorků č.12.a, 12.b a 12.c byly místy zkorodovány tak, že docházelo k uvolnění vlnovců. Toto napadení bylo nalezeno pouze u tohoto typu materiálové kombinace.

6.4.3.3 Vyhodnocení působení 4.kondenzátu v opakovaném statickém testu II

Stejně jako v předcházejících podkapitolách jsou na následujících obrázcích seřazeny podle typu materiálu vybrané skupiny snímků plátů a vlnovců po opakovaném statickém testu ve 4. kondenzátu. Na snímcích níže, viz Obr. 6.4.35, je výběr fotografií vzorků 1.a, 1.b a 1.c zhotovených z materiálu Alcan 3916 s vlnovcem jakosti 3003.



Obr. 6.4.35 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Alcan 3916 (a) a vlnovců jakosti 3003 (b) testovaných v kondenzátu č. 4.

Napadení plátů materiálu Alcan 3916 ve 4. kondenzátu se nejčastěji projevovala důlkovou korozi, na vzorcích 1.a a 1.c bylo objeveno i mezikrystalové napadení materiálu. Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky plátů jsou uvedeny níže, viz Tab. 6.4.26, kde červené zvýraznění označuje mezikrystalovou korozi a oranžové zvýraznění pak úbytek tloušťky přesahující 30% povoleného úbytku materiálu.

Tab. 6.4.26 Zbytková tloušťka plátů materiálu Alcan 3916 testovaných v kondenzátu č.4
v opakovaném statickém testu II.

Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]							Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec									
1.a_4	Alcan 3916	3003	0,28	0,27	0,28	0,27	0,25	0,26	0,24	0,35	
1.b_4	Alcan 3916	3003	0,27	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28	0,24	0,35	
1.c_4	Alcan 3916	3003	0,23	0,29	0,27	0,3	0,27	0,27	0,24	0,35	

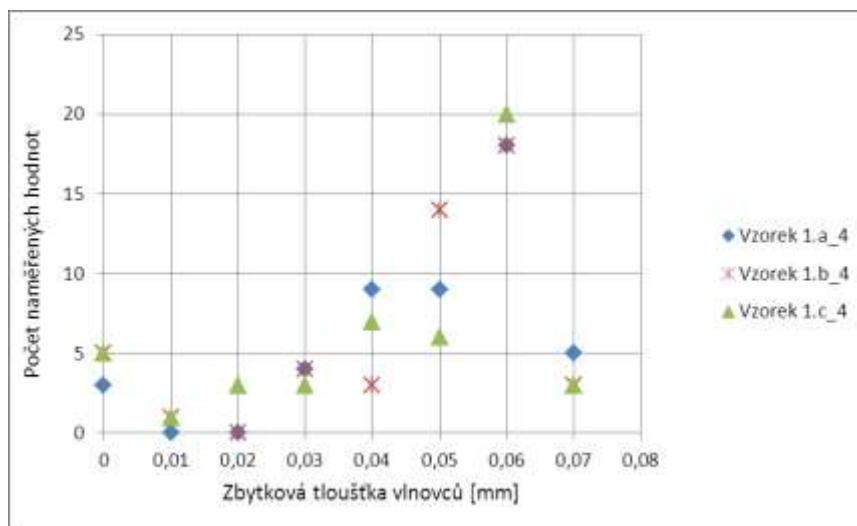
= MZK

= úbytek
>30%

Následující tabulka, viz Tab. 6.4.27, obsahuje naměřená data zbytkové tloušťky vlnovců, která jsou pro přehlednost uvedena v grafu, viz Obr. 6.4.36. Vlnovce byly místy zkorodovány skrz celou tloušťku, ale zůstávaly celistvé, korozní napadení vlnovců všech tří vzorků bylo podobné.

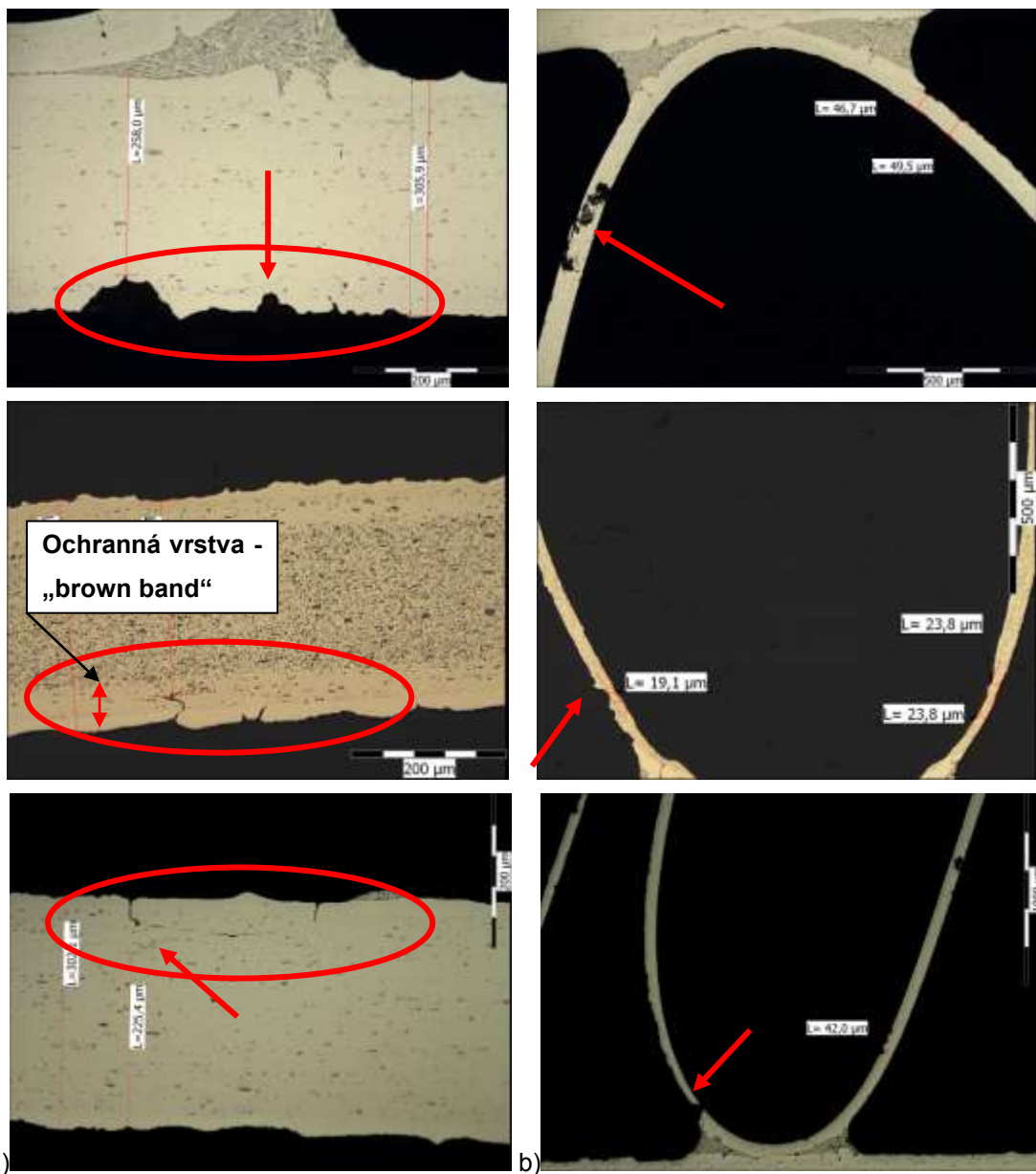
Tab. 6.4.27 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 v kombinaci s materiálem plátu Alcan 3916 testovaných v kondenzátu č.4.

Vzorek 1.a4 [mm]		Vzorek 1.b4 [mm]		Vzorek 1.c4 [mm]	
0,06	0,05	0,03	0,06	0,06	0,06
0,05	0,00	0,04	0,06	0,06	0,06
0,06	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06
0,07	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06
0,06	0,03	0,06	0,06	0,00	0,04
0,06	0,03	0,05	0,05	0,00	0,06
0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05
0,06	0,04	0,06	0,06	0,07	0,04
0,07	0,04	0,05	0,05	0,05	0,03
0,03	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05
0,04	0,07	0,01	0,03	0,04	0,06
0,05	0,05	0,00	0,03	0,02	0,00
0,00	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04
0,06	0,05	0,06	0,00	0,04	0,03
0,06	0,05	0,06	0,06	0,00	0,04
0,04	0,00	0,05	0,00	0,06	0,05
0,04	0,05	0,06	0,03	0,06	0,05
0,04	0,06	0,07	0,05	0,06	0,06
0,03	0,05	0,04	0,05	0,02	0,07
0,06	0,06	0,05	0,06	0,03	0,07
0,04	0,06	0,00	0,06	0,06	0,06
0,06	0,05	0,00	0,06	0,01	0,05
0,06	0,06	0,05	0,06	0,02	0,06
0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,00



Obr. 6.4.36 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 v kombinaci s materiálem plátu Alcan 3916 testovaných v kondenzátu č.4.

Níže, viz Obr. 6.4.37, jsou snímky vzorků č.4 vyrobených z materiálu plátů Sapa 7873 a vlnovce jakosti 3003 s přidavkem zinku.



Obr. 6.4.37 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Sapa 7873 (a) a vlnovců jakosti 3003+1,5% Zn (b) testovaných v kondenzátu č.4.

Všechny vzorky plátů byly kromě důlkové napadeny i mezikrystalovou korozí, naměřené hodnoty zbytkové tloušťky jsou uvedeny v tabulce, viz Tab. 6.4.28.

Vlnovce byly napadeny jak důlkovou tak mezikrystalovou korozí, ale i přes zkorodování skrz celou tloušťku si zachovaly celistvost.

Tab. 6.4.28 Zbytková tloušťka plátů materiálu Sapa 7873 testovaných v kondenzátu č.4
v opakovaném statickém testu II.

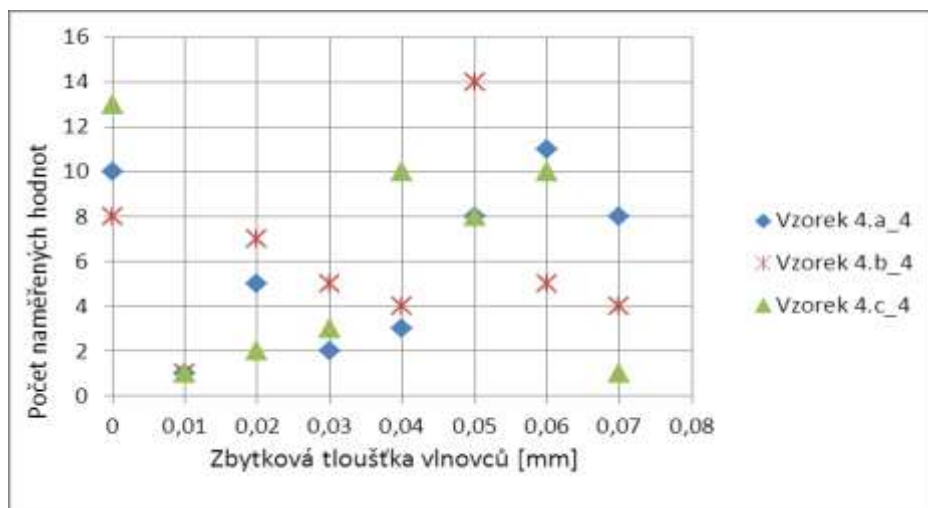
Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]							Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec									
4.a_4	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,23	0,33	
4.b_4	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,24	0,23	0,33	
4.c_4	Sapa 7873	3003+1,5%Zn	0,22	0,28	0,26	0,26	0,26	0,24	0,23	0,33	

 = MZK

Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jsou uvedeny v tabulce, viz Tab. 6.4.29. Vynesení těchto hodnot do grafu je na obrázku, viz Obr. 6.4.38, korozní napadení vlnovců všech tří vzorků, tedy jejich hodnoty zbytkové tloušťky, je podobné.

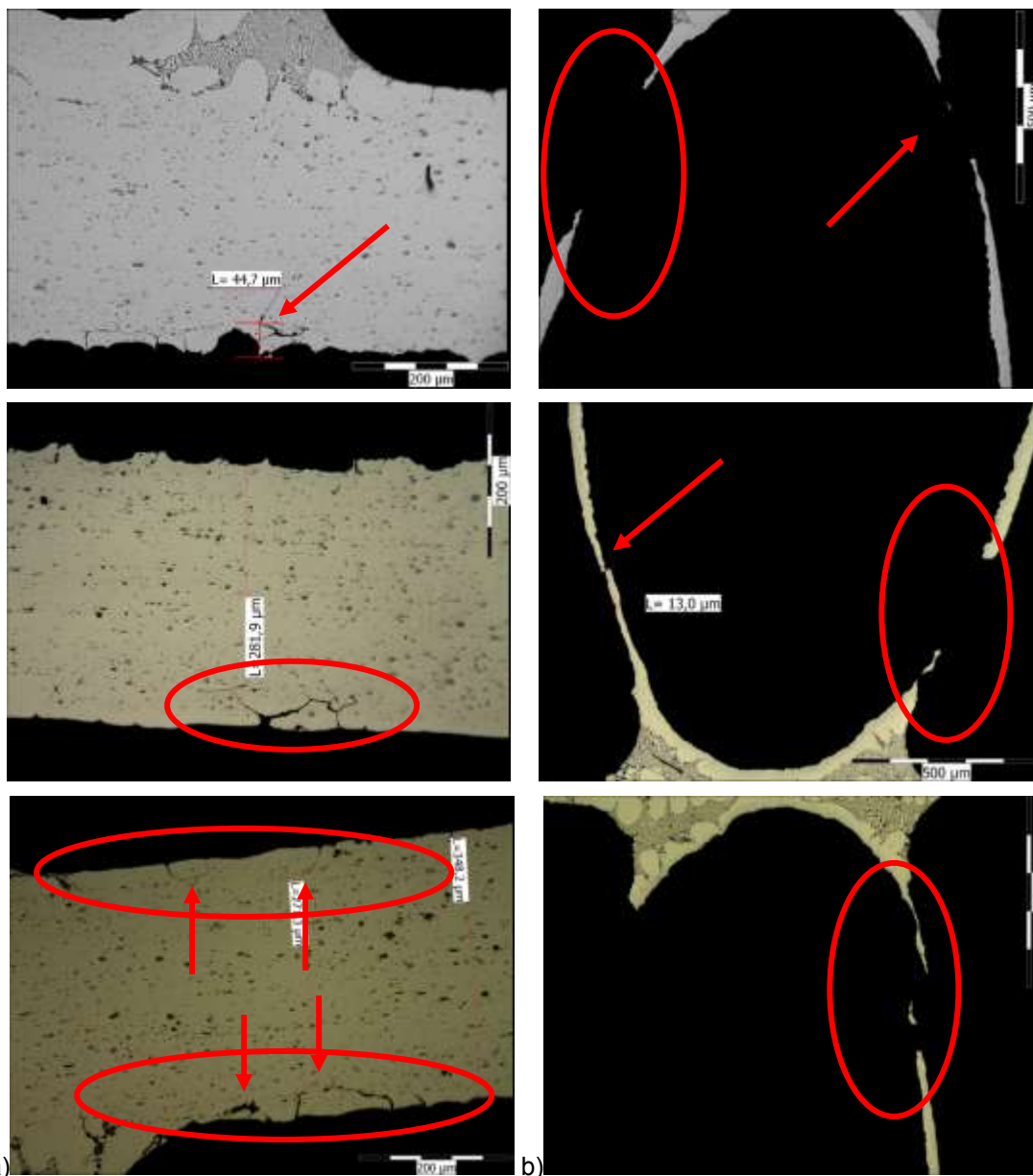
Tab. 6.4.29 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci
s materiálem plátu Sapa 7873 testovaných v kondenzátu č.4.

Vzorek 4.a4 [mm]		Vzorek 4.b4 [mm]		Vzorek 4.c4 [mm]	
0,05	0,06	0,03	0,06	0,00	0,00
0,06	0,06	0,00	0,05	0,00	0,04
0,06	0,07	0,00	0,05	0,00	0,00
0,03	0,06	0,04	0,05	0,00	0,05
0,05	0,07	0,02	0,04	0,05	0,05
0,05	0,06	0,05	0,05	0,04	0,05
0,07	0,06	0,00	0,06	0,00	0,03
0,07	0,07	0,00	0,05	0,00	0,01
0,07	0,07	0,00	0,07	0,00	0,02
0,06	0,06	0,05	0,05	0,00	0,04
0,07	0,05	0,05	0,03	0,04	0,03
0,00	0,06	0,00	0,05	0,00	0,02
0,06	0,00	0,05	0,02	0,06	0,04
0,02	0,00	0,00	0,02	0,04	0,04
0,05	0,05	0,05	0,02	0,00	0,04
0,00	0,00	0,07	0,02	0,06	0,06
0,00	0,00	0,07	0,03	0,05	0,05
0,05	0,00	0,07	0,00	0,06	0,05
0,00	0,01	0,06	0,04	0,06	0,03
0,05	0,02	0,05	0,05	0,06	0,04
0,02	0,04	0,06	0,04	0,00	0,04
0,02	0,00	0,06	0,01	0,07	0,06
0,03	0,04	0,03	0,02	0,06	0,06
0,02	0,04	0,02	0,03	0,05	0,06



Obr. 6.4.38 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnoců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Sapa 7873 testovaných v kondenzátu č.4.

Následující snímky zachycují korozní napadení plátů a vlnoců vzorků č.8.a, 8.b a 8.c, vyrobené z materiálů plátů Aleris 3527 a vlnoců jakosti 3003 s přidavkem zinku.



Obr. 6.4.39 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Aleris 3527 a) a vlnovce jakosti 3003+1,5% Zn b) testovaných v kondenzátu č.4.

Na všech vzorcích se opět kromě důlkového vyskytovalo i mezikrystalové napadení a to jak na plátech, tak vlnovcích, které byly místy zkorodovány skrz celou jejich tloušťku, viz Obr. 6.4.39. Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky plátů jsou uvedeny v tabulce, viz Tab. 6.4.30, kde je typ mezikrystalového napadení zvýrazněn červeně.

Tab. 6.4.30 Zbytková tloušťka plátů materiálu Aleris 3527 testovaných v kondenzátu č.4
v opakovaném statickém testu II.

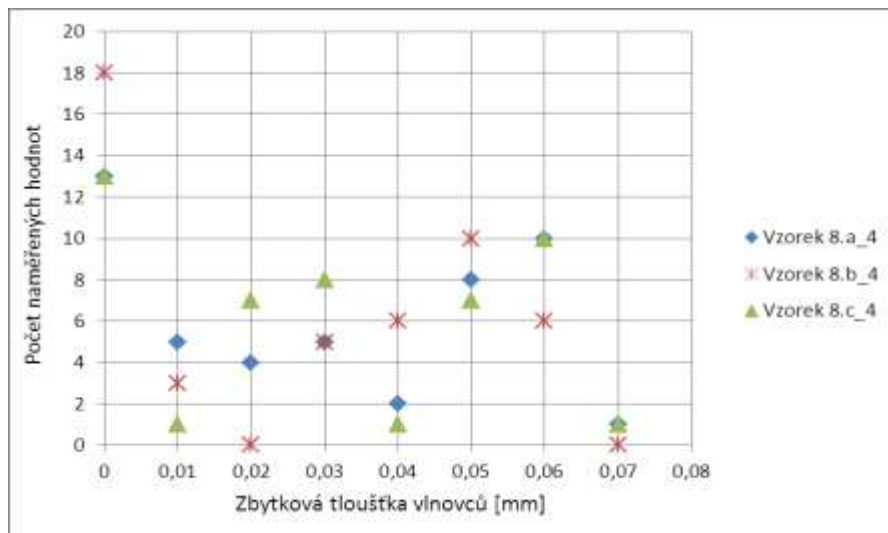
Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]							Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec									
8.a_4	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,31	0,29	0,31	0,32	0,32	0,32	0,27	0,39	
8.b_4	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,31	0,31	0,3	0,31	0,28	0,34	0,27	0,39	
8.c_4	Aleris 3527	3003+1,5%Zn	0,3	0,31	0,31	0,27	0,31	0,32	0,27	0,39	

= MZK

Naměřené hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jsou uvedeny v tabulce, viz Tab. 6.4.31, z dat je patrná úplná degradace materiálu (nulové hodnoty zbytkové tloušťky), zejména u vzorku 8.b, i když podle vynesení dat do grafu lze považovat korozní napadení vlnovců jako podobné, viz. Obr. 6.4.40.

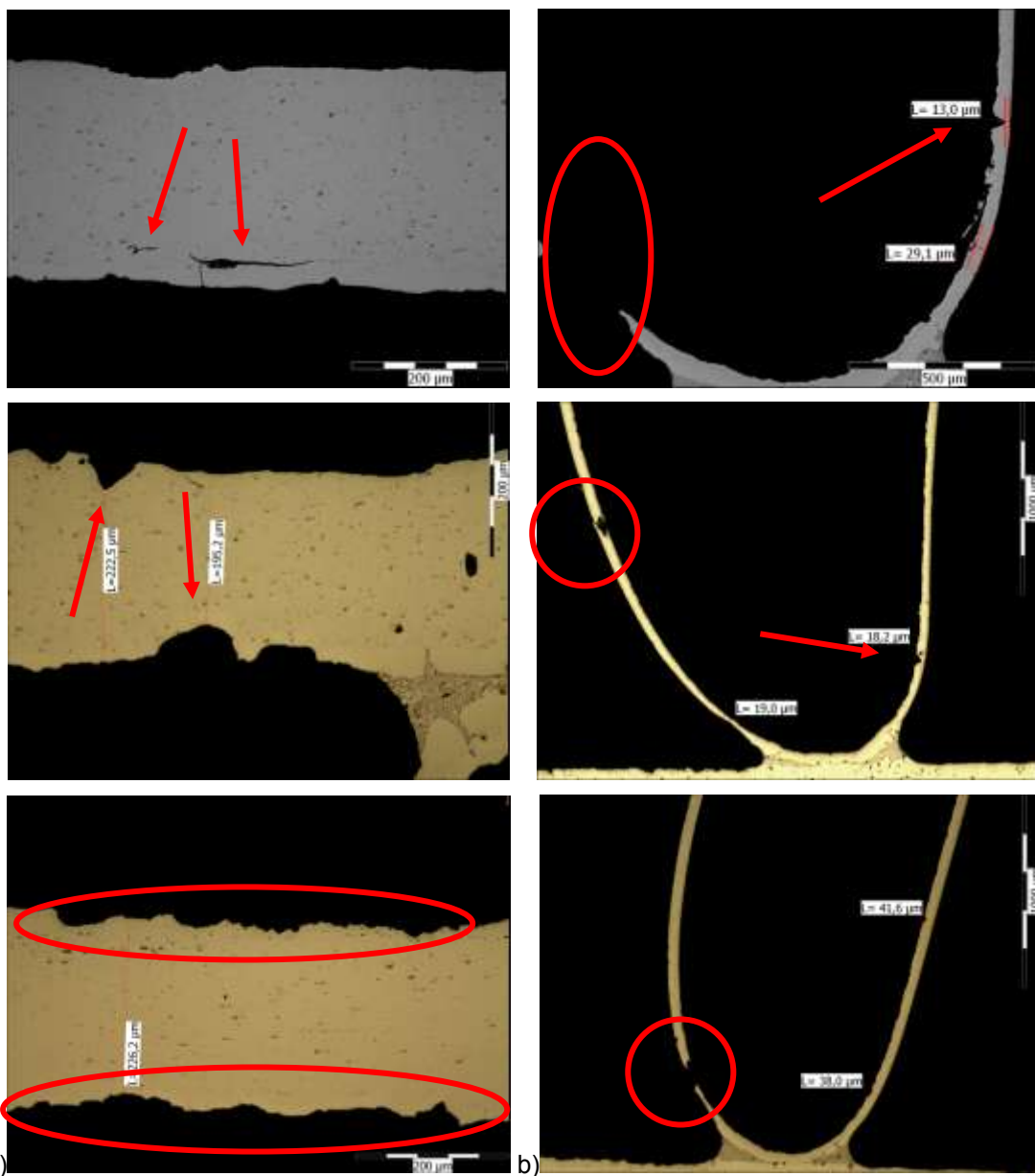
Tab. 6.4.31 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Aleris 3527 testovaných v kondenzátu č.4.

Vzorek 8.4a [mm]		Vzorek 8.4b [mm]		Vzorek 8.4c [mm]	
0,06	0,06	0	0,03	0,06	0,05
0,06	0,04	0	0,04	0,06	0,05
0,06	0,05	0	0	0,07	0,06
0,05	0,03	0,03	0	0,04	0,05
0,05	0,05	0	0	0,06	0,05
0,06	0,07	0,03	0	0,06	0,05
0,06	0,05	0	0,01	0,02	0
0,06	0,04	0	0	0,03	0,06
0,06	0,03	0	0	0,06	0,05
0,05	0	0,01	0,01	0,05	0,03
0,03	0,06	0,03	0	0,06	0,06
0,05	0,06	0	0	0,06	0
0	0	0,05	0,05	0	0
0	0	0,04	0,05	0,03	0
0	0	0,04	0,04	0,03	0
0	0	0,06	0,05	0,03	0,01
0,02	0,02	0,05	0,05	0,03	0,02
0,02	0,01	0,06	0,04	0	0
0	0,02	0	0,06	0,02	0
0	0,01	0,05	0,06	0	0,02
0	0,01	0,03	0,05	0,02	0,02
0	0,05	0	0,06	0	0,03
0,01	0,03	0,06	0,04	0	0,02
0,01	0,03	0,05	0,05	0	0,03



Obr. 6.4.40 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnoců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Aleris 3527 testovaných v kondenzátu č.4.

Níže jsou vyobrazeny snímky vzorků č.12.a, 12.b a 12.c vyrobených z materiálu plátů Aleris 3542 a vlnoců jakosti 3003 s přidavkem zinku testovaných v kondenzátu č.4.



Obr. 6.4.41 Vybrané snímky korozního napadení plátů materiálu Aleris 3542 a) a vlnovce jakosti 3003+1,5% Zn b) testovaných v kondenzátu č.4.

Ze snímků výše, viz Obr. 6.4.41, lze vidět, že hlavním mechanismem korozního napadení u těchto vzorků byla důlková a rovnoměrná koroze plátů, i když u všech vzorků se objevila i mezikrystalová koroze. Hodnoty zbytkové tloušťky plátů jsou uvedeny v tabulce, viz Tab. 6.4.33. Vlnovce byly místy zkorodovány skrz celou tloušťku materiálu.

Tab. 6.4.32 Zbytková tloušťka plátů materiálu Aleris 3542 testovaných v kondenzátu č.4
v opakovaném statickém testu II.

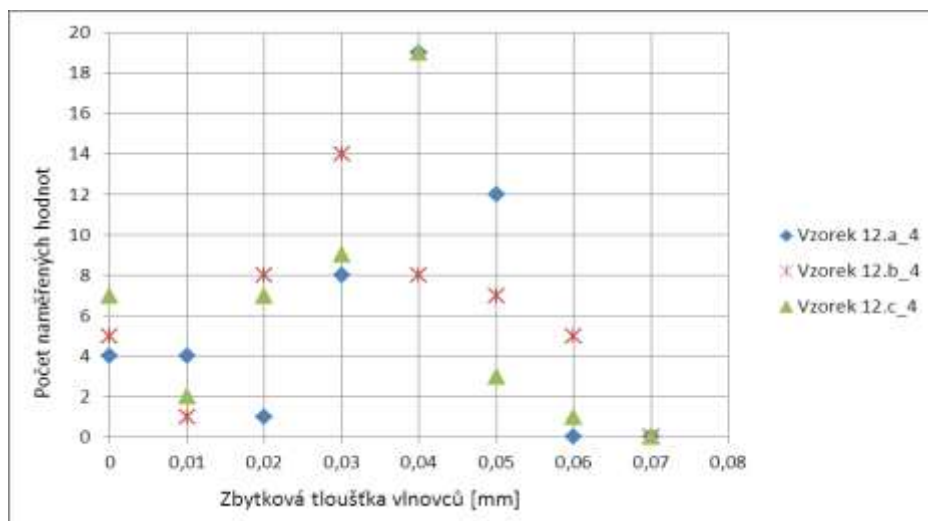
Vzorek	Materiálová kombinace		Zbytková tloušťka plátů [mm]						Max. povolená zbytková tloušťka [mm]	Původní tloušťka plátů [mm]
	Plát	Vlnovec								
12.a_4	Aleris 2542	3003+1,5%Zn	0,24	0,24	0,23	0,20	0,23	0,20	0,21	0,30
12.b_4	Aleris 3542	3003+1,5%Zn	0,21	0,21	0,20	0,20	0,26	0,25	0,21	0,30
12.c_4	Aleris 3542	3003+1,5%Zn	0,21	0,22	0,23	0,23	0,24	0,22	0,21	0,30

 = MZK	 = úbytek >30%
---	---

V tabulce, viz Tab. 6.4.33, jsou uvedeny hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců vzorků č.12.a, 12.b a 12.c, i když byly místy zkorodovány skrz celou tloušťku, zachovaly si vlnovce svou celistvost. Naměřené hodnoty jsou opět pro lepší orientaci vyneseny do grafu, viz Obr. 6.4.42. Lze říci, že korozní napadení vlnovců všech tří vzorků bylo podobné.

Tab. 6.4.33 Hodnoty zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Aleris 3542 testovaných v kondenzátu č.4.

Vzorek 12.4a [mm]		Vzorek 12.4b [mm]		Vzorek 12.4c [mm]	
0,04	0,04	0,03	0,05	0,04	0,01
0,04	0,04	0,03	0,06	0,04	0,02
0,04	0,05	0,05	0,06	0	0,02
0,01	0,03	0,02	0,06	0,03	0
0,03	0,03	0,02	0,05	0,03	0
0	0,04	0	0	0	0
0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0
0,04	0,05	0,02	0,03	0,02	0,04
0	0,05	0,05	0,03	0,03	0,04
0,03	0	0,02	0,04	0,04	0,05
0,02	0,04	0,02	0	0,02	0,05
0,05	0,05	0,04	0,04	0,01	0
0,03	0,05	0,02	0	0,04	0,04
0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	0,04
0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,06
0,03	0,05	0,02	0,03	0,03	0,05
0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04
0,01	0	0,04	0,03	0,04	0,04
0,04	0,01	0,01	0,03	0,04	0,03
0,04	0,01	0,04	0,03	0,04	0,02
0,03	0,05	0,05	0,03	0,03	0,04
0,04	0,04	0,06	0,05	0,04	0,04
0,04	0,05	0,06	0,04	0,02	0,04
0,04	0,04	0	0,05	0,03	0,04

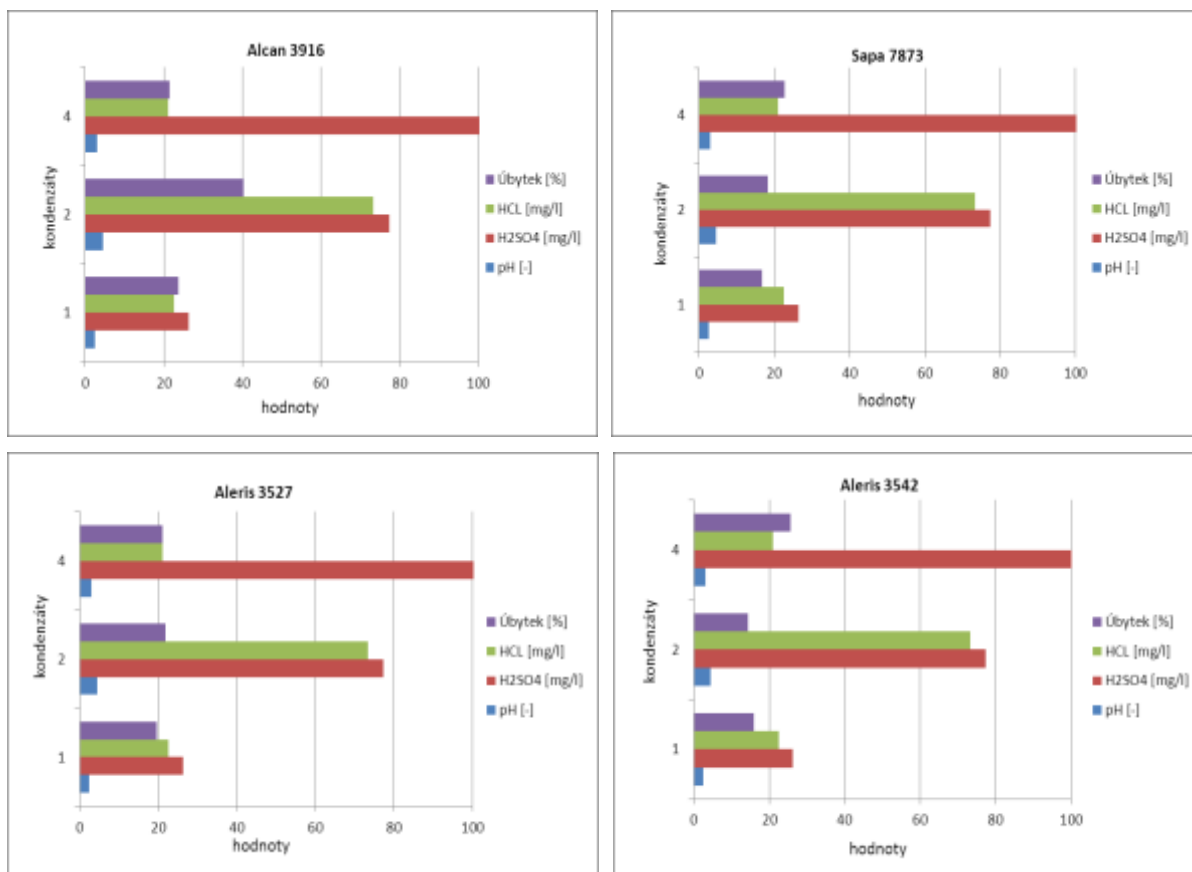


Obr. 6.4.42 Grafické znázornění hodnot zbytkové tloušťky vlnovců jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem plátu Aleris 3542 testovaných v kondenzátu č.4.

Vyhodnocením výsledků opakovaného testu v kondenzátu č.4 lze shrnout následující závěry:

- U všech testovaných vzorků se projevilo mezikrystalové napadení plátů a protože je mezikrystalová koroze nežádoucí, žádný z těchto materiálů nevyhověl.
- Nejčastějším typem napadení plátů byla důlková koroze, která u vzorků č.1 a č.12 přesáhla 30% povolený úbytek materiálu.
- Nejčastějším typem napadení vlnovců byla mezikrystalová koroze. Nejvíce degradován byl vlnovec jakosti 3003 s přidavkem zinku v kombinaci s materiálem Aleris 3527 a Sapa 7873.
- Vlnovce vyrobené ze slitiny jakosti 3003 bez přidavku zinku u vzorků 1.a, 1.b a 1.c a vlnovce jakosti 3003 se zinkem u vzorků 12.a, 12.b a 12.c vykazovaly v testu lepší odolnost vůči korozi než vlnovce vzorků 4.a, 4.b a 4.c a 8.a, 8.b a 8.c, i když i u nich byla zaznamenána koroze skrz celou tloušťku.

Výsledkem opakovaného statického testu tedy bylo, že žádný materiál nevyhověl ve všech kondenzátech. Všechny materiály podléhaly mezikrystalové korozi, s výjimkou materiálu Aleris 3542 v kondenzátu č.2. Vzhledem k tomu, že v jiných kondenzátech byl průběh koroze tohoto materiálu mezikrystalový, nelze doporučit pro výrobu chladičů plnicího vzduchu ani tento materiál. Materiály vlnovců rovněž korodovaly mezikrystalově, často docházelo k jejich úplné degradaci.

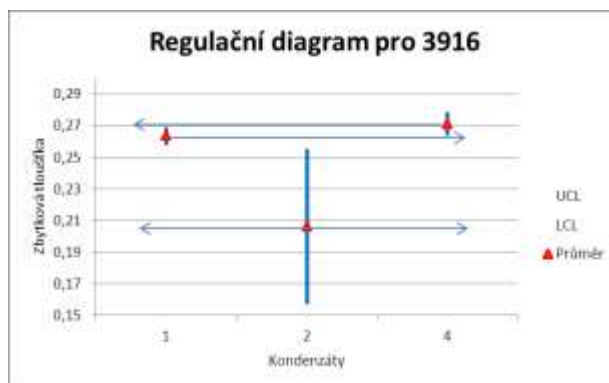


Obr. 6.4.43 Grafické srovnání zbytkové tloušťky plátů testovaných v jednotlivých kondenzátech: a) Alcan 3916, b) Sapa 7873, c) Aleris 3527, d) Aleris 3542.

Pomocí grafického vyjádření výsledků opakovaného statického testu II, viz Obr. 6.4.43, lze vyhodnotit agresivitu kondenzátů na jednotlivé materiály. V každé skupině sloupců pro daný kondenzát, definovaný na ose y, jsou vynesena data hodnoty úbytku daného materiálu, vyjádřeno v % fialově, ostatní sloupce znázorňují množství složek v kondenzátu, konkrétně HCl zeleně a H₂SO₄ červeně a hodnotu pH modře. Pro materiál Alcan 3916 platí, že nejagresivnější působení bylo v kondenzátu č.2. Kondenzáty č.1 a 4 způsobovaly podobný úbytek tloušťky. Na materiál Sapa 7873 nejvíce agresivně působil kondenzát č.4 s největším úbytkem tloušťky, pak kondenzát č.2 a nejméně kondenzát č.1. Materiál Aleris 3527 podléhal nejvíce korozi v kondenzátu č.2 a č.4 a materiál Aleris 3542 měl největší úbytky materiálu v kondenzátu č.4.

6.4.4 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ TESTŮ (VÝSLEDKŮ)

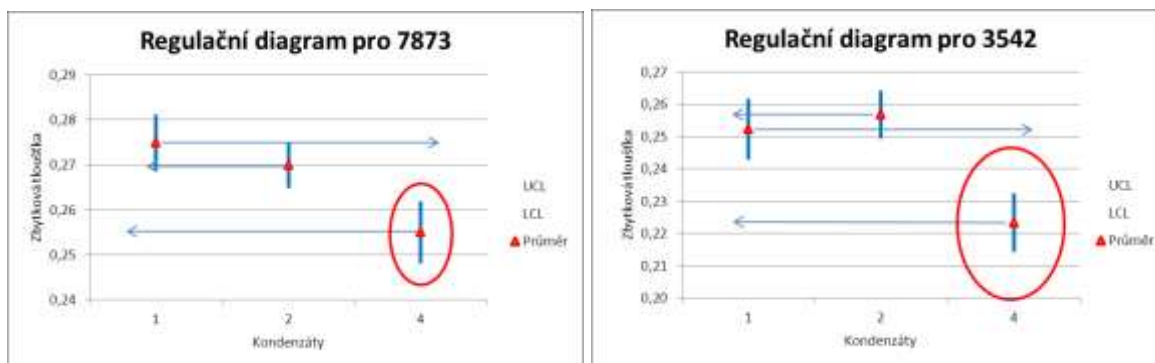
Grafickým znázorněním pomocí regulačních diagramů lze vyhodnotit účinek jednotlivých kondenzátů na daný materiál. V diagramech jsou znázorněny centrální linie s očekávanými nebo referenčními hodnotami (tedy se zbytkovou tloušťkou) a regulační meze dolní (LCL) a horní (UCL). Tyto meze určují interval, ve kterém se s velkou pravděpodobností pohybují charakteristiky znaku, v našem případě průměr.



Obr. 6.4.44 Regulační diagram znázorňující rozmezí naměřených zbytkové tloušťky materiálu 3916.

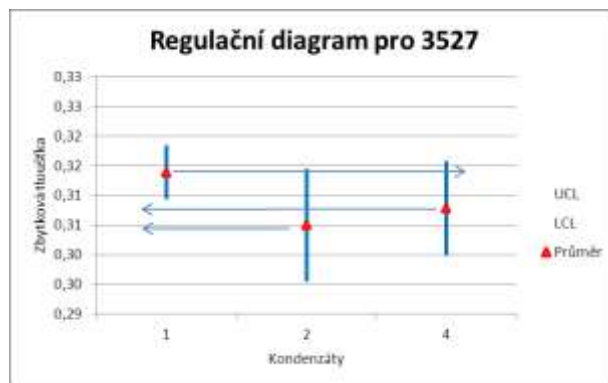
Z grafické analýzy, viz Obr. 6.4.44, a také ze statistického výpočtu (dvouvýběrový F-test) je zřejmé, že kondenzáty č. 1 a 4 v působení na materiál 3916 nejsou významně rozdílné, to tedy znamená, že úbytek materiálu 3916 v obou kondenzátech je velmi podobný. Kdežto v kondenzátu č.2 dochází k výrazné degradaci materiálu.

Z naměřených a následně graficky znázorněných hodnot zůstatkové tloušťky materiálu 7873 vyplývá, že kondenzáty č. 1 a 2 nejsou významně rozdílné mezi sebou v porovnání s kondenzátem č.4. Největší korozní napadení materiálu 7873 bylo zaznamenáno v kondenzátu č.4. Stejné působení kondenzátů bylo zaznamenáno i pro materiál 3542.



Obr. 6.4.45 Regulační diagramy znázorňující rozmezí naměřené zůstatkové tloušťky materiálů 7873 a 3542.

Analýza zbytkové tloušťky materiálu 3527, viz Obr. 6.4.46, charakterizuje nevýznamný rozdíl v působení kondenzátů č. 2 a 4. Kdežto u kondenzátu č.1 není jeho působení na materiál zcela zjevné, proto se musely provést další statistické analýzy (dvouvýběrový F-test, dvouvýběrový t-Test s nerovností rozptylu), které potvrdily, že všechny tři kondenzáty nevykazují mezi sebou významný rozdíl, tudíž účinek všech tří kondenzátů na materiál 3527 je podobný.



Obr. 6.4.46 Regulační diagram znázorňující rozmezí naměřených zbytkové tloušťky materiálu 3527.

Ze statistického vyhodnocení tedy vyplývá, že kondenzát č.4 působil agresivně na materiály 7873 a 3542. Největší degradaci materiálu 3916 způsobil kondenzát č.2 a na materiál 3527 působily kondenzáty podobně. Složení materiálů 7873 a 3542 je dosti rozdílné, nevysvětluje podobný korozní účinek kondenzátu č.4 na oba materiály. Podobnost ve složení je sice u materiálů 3527 a 7873, kdy ale na slitinu 3527 působily všechny kondenzáty podobně.

Shrnutím statistického ověření lze určit jako nejvíce agresivní kondenzáty č.2 a č.4, kdy kondenzát č.2 obsahuje 3x více kyseliny chlorovodíkové, ale má vyšší hodnotu pH (4,5) než kondenzát č.4, jehož hodnota pH je rovna 3, navíc obsahuje přibližně 17x více kyseliny sírové. Srovnáním kondenzátu č.1 a č.4 je možno vyvodit závěr, že nejen kyselina chlorovodíková, ale i sírová má vliv na korozi materiálu. Ačkoli má kondenzát č.1 hodnotu pH rovnu 2,5 a obsah kyseliny chlorovodíkové přibližně stejný jako kondenzát č.4, její korozní účinek na materiály není tak agresivní jako u kondenzátu č.4, jehož obsah kyseliny sírové je ca 50x větší, což potvrzuje teoretické poznatky o účinku kyseliny sírové na korozi hliníkových slitin. Ovšem není známo, že by tato úloha byla v automobilové praxi řešena v souvislosti s chlazením stlačeného vzduchu v sání motoru.

6.5 STATICKÝ TEST III

Na základě výsledků statického testu II bylo navrženo otestovat nové, v aplikaci tepelných výměníků zatím nepoužívané, vícevrstvé materiály – tzv.multiclad. Po dohodě s výrobcí automobilů byla navržena úprava metodiky testování. Jedna ze společností vyrábějící automobily nabídla změnu kondenzátu.

Bylo tedy rozhodnuto provést dva na sobě nezávislé testy:

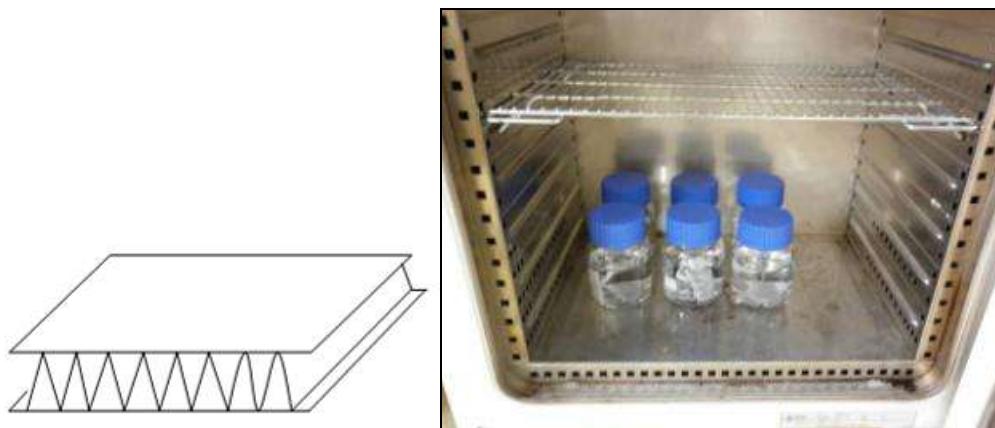
- Jeden podle podmínek specifikace VDA 230-214 s vlastním kondenzátem, ale protože nelze provést testování tohoto typu ve vlastní laboratoři, je tento test prováděn externě. Výsledky testu v době kompletace disertační práce ještě nebyly k dispozici, proto se tato zkouška dále nezmiňuje.
- Druhý test podle následujících podmínek s novým kondenzátem, ten má sice nižší hodnotu pH, ale oproti původnímu byly sníženy obsahy kyseliny dusičné, sírové a octové a zvýšen podíl chlorovodíkové kyseliny. Chloridy mají sice na korozi hliníku značný vliv, ale podle dosavadního zkoušení bylo ověřeno, že i hodnoty pH a

zejména obsah sirných sloučenin mají značně negativní vliv na odolnost hliníkových slitin vůči korozi. Složení obou kondenzátů je uvedeno níže, viz *Tab. 6.5.1*.

Tab. 6.5.1 Srovnání složení původního a nového kondenzátu

		Č.4	Č.5
pH		3	2,7 - 2,8
Kyselina dusičná (HNO ₃)	[mg/l]	130	60
Kyselina sírová (H ₂ SO ₄)	[mg/l]	1340	56
Kyselina mravenčí (HCOOH)	[mg/l]	99	70
Kyselina octová (CH ₃ COOH)	[mg/l]	897	65
Kyselina chlorovodíková (HCl)	[mg/l]	21	50
Formaldehyd (CH ₂ O)	[mg/l]	171	-
Dusitan sodný (NaNO ₂)	[mg/l]	207	-
Siřičitan sodný (Na ₂ SO ₃)	[mg/l]	139	-
Podíl síry v palivu	[ppm]		15

Pro tuto zkoušku byly vzorky vyrobeny ze dvou plátů spojených vlnovcem, viz *Obr. 6.5.1*.



Obr. 6.5.1 Schéma vzorků pro ponorový test vlevo a umístění vzorků v komoře.

Test probíhal za následujících podmínek:

- Celková doba testu – 10 týdnů
- 8 hodin ponor
- Teplota v peci $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- 16 hodin sušení
- Teplota sušení $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Vzorky byly při ponoření do kondenzátu uzavřeny jednotlivě v nádobách a umístěny v teplotní komoře. Při každém vyjmutí vzorků se po vychladnutí měřila hodnota pH kondenzátu a pokud došlo ke změně pH hodnoty ($\pm 0,5$), byl kondenzát vyměněn za čerstvý. Množství kondenzátu odpovídalo poměru 60 l/m^2 . Složení a pH kondenzátu je uvedeno níže, viz *Tab. 6.5.2*.

Tab. 6.5.2 Složení a pH kondenzátu použitého při ponorovém testu.

pH	HNO ₃ mg/l	H ₂ SO ₄ mg/l	HCOOH mg/l	CH ₃ COOH mg/l	HCl mg/l	Obsah S ppm
2,7 - 2,8	60	56	70	65	50	15

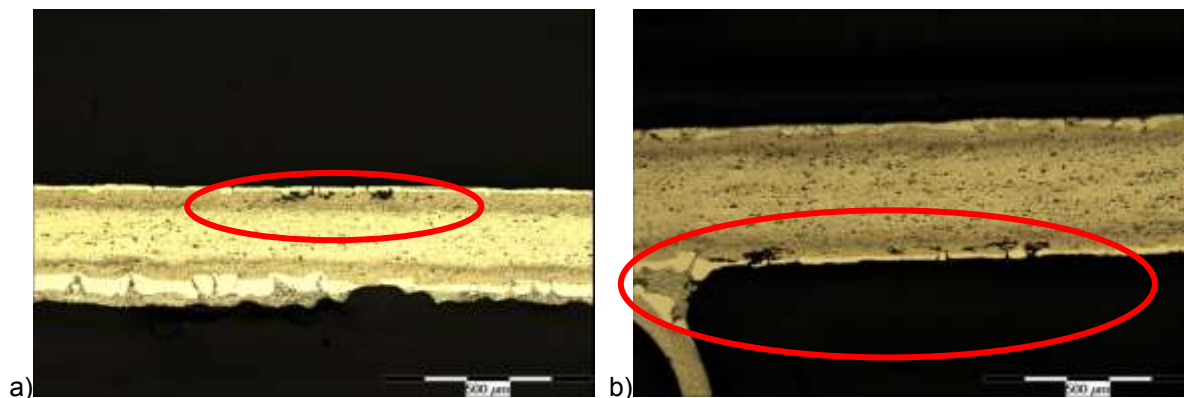
Samotný test trval deset týdnů, ovšem některé vybrané materiály vzorků byly vyhodnocovány po každém druhém uplynulém týdnu testu, aby se zjistila účinnost kondenzátu v čase. Vzorky byly vyrobeny z již otestovaných materiálů long life slitin, viz kap.5.2, ve statickém testu II, a to proto, aby bylo možno porovnat účinky nejen kondenzátu ale i pozměněného průběhu testu [V3]. Nově byly do této zkoušky zařazeny vzorky materiálů typu multiclاد – vícevrstvé slitiny pro pláty, tyto materiály jsou doporučovány jejich výrobcí jako velice odolné vůči korozi díky ochranné mezivrstvě, viz kap.5.3. Materiály vzorků a jejich značení je uvedeno níže, viz Tab. 6.5.3.

Tab. 6.5.3 Značení a materiály vzorků pro ponorový test.

Vzorky	č.	Materiálová kombinace		Vzorky pro vyhodnocení				
		Plát	Vlnovec	2 týdny	4 týdny	6 týdnů	8 týdnů	10 týdnů
1-5	1.1	Alcan 3916	3003+1.5%Zn	○	○	○	○	○
6-10	2.1	Aleris 3542 mod.	3003+1.5%Zn	○	○	○	○	○
11-15	3.1	Alcoa 0333	3003	○	○	○	○	○
16	4.1	Aleris 3527	3003	-	-	-	-	○
17	5.1	Aleris 3527	3003+1.5%Zn	-	-	-	-	○
18	6.1	Aleris 3527	3003+1.5%Zn SSG	-	-	-	-	○
19	7.1	Sapa multiclاد	3003+1.5%Zn	-	-	-	-	○
20	8.1	Aleris multiclاد	3003+1.5%Zn	-	-	-	-	○

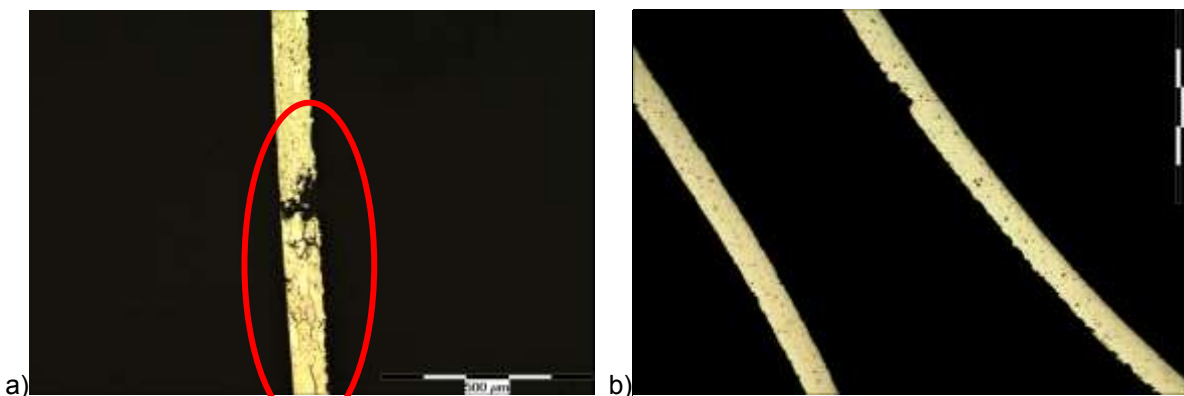
SSG-sagging strong resistance – odolnost proti průhybu

Vyhodnocení vzorků bylo opět provedeno metalograficky a to podle tabulky, viz Tab. 6.5.3, kdy, jak již bylo uvedeno výše, byly první tři vzorky vyhodnoceny co druhý týden, aby se zjistilo působení kondenzátů a reakce materiálu v čase. Průběh koroze po prvních čtyřech týdnech byl mírný a rovnoměrný. Po šesti týdnech se na materiálech projevovala mezikrystalová koroze, ale ta ani po deseti týdnech nepřesáhla ochrannou vrstvu „brown band“ ve slitinách long life. Po penetraci povrchu byl další průběh koroze laterální. Pro ukázkou byly ze všech vzorků vybrány jen dva snímky long life slitin, a sice Alcan 3916 a Alcoa 0333, viz Obr. 6.5.2. Na obou snímcích plátů lze vidět ochrannou vrstvu jako tmavší hnědé pásy. Koroze probíhala v této anodické vrstvě, čímž docházelo k zabránění korozního působení na základní materiál.



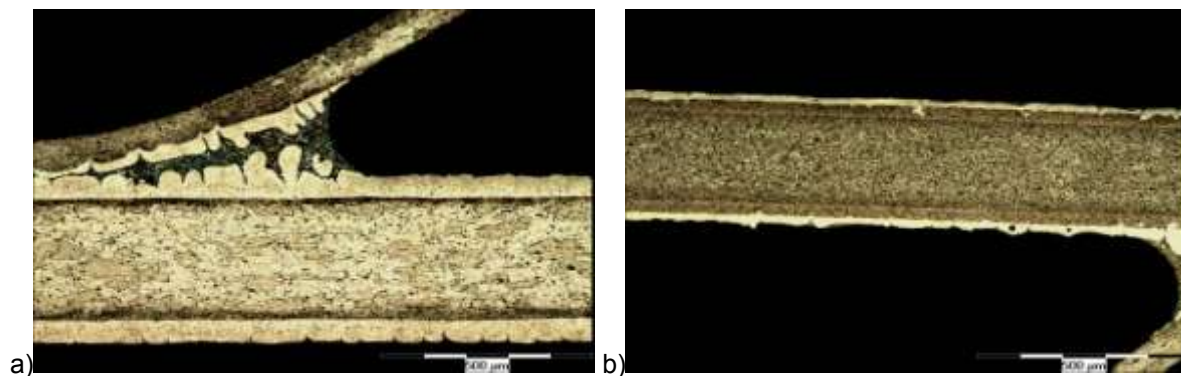
Obr. 6.5.2 Snímky plátů napadených MZK po statickém testu III, a) vzorek č.5 a b) vzorek č.15, tmavé pásy pod povrchem znázorňují ochrannou vrstvu zvanou brown band.

Korozní průběh u vlnovců jakosti 3003 s přídavkem zinku byl mezikrystalový, jak lze vidět na obrázku, viz Obr. 6.5.3 a). Vlnovce byly sice místy zkorodovány přes celou tloušťku materiálu, ale jejich soudržnost zůstala zachována. Korozí u vlnovců vyrobených ze slitiny jakosti 3003 bez zinku byla rovnoměrná. Z toho tedy vyplývá, že vlnovce s přídavkem zinku nejsou vhodným materiálem pro tuto aplikaci.

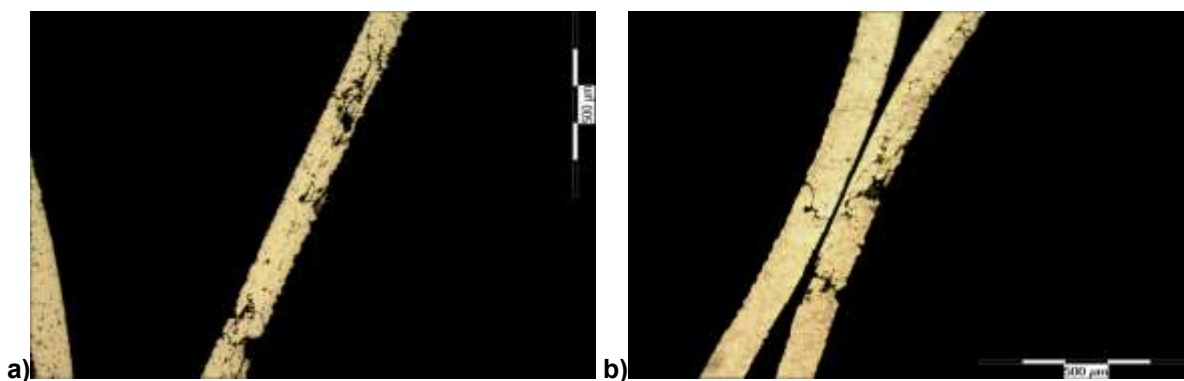


Obr. 6.5.3 Snímky vlnovců napadených MZK po statickém testu III a) vzorek č.5 a b) vzorek č.16.

Na následujících snímcích jsou vyobrazeny materiály typu multiclád, jejichž povrch vykazuje pouze mírné napadení povrchu, viz Obr. 6.5.4. Tyto materiály však byly spojeny s vlnovci, které ale korodovaly stejně jako v kombinaci s long life slitinami, tedy mezikrystalově, viz Obr. 6.5.5.



Obr. 6.5.4 Metalografický výbrus vzorků multiclad po statickém testu III a) vzorek č.19, b) vzorek č.20, leptáno Kellerovým roztokem.

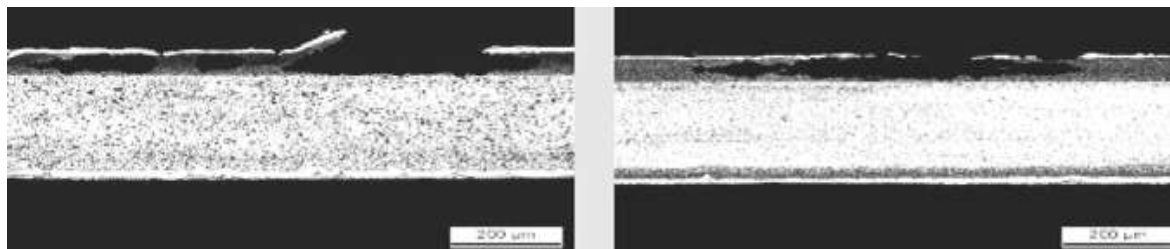


Obr. 6.5.5 Snímky vlnovců napadených MZK po statickém testu III a) vzorek č.19 a b) vzorek č.20.

Vyhodnocení výsledků statického testu III lze učinit následující závěry:

- Testu jednoznačně nevyhověly žádné vzorky, ať už z důvodu koroze plátů nebo vlnovců.
- Pláty vyrobené z materiálů multiclad po testu vykazovaly jen mírné působení koroze.
- Koroznímu působení v testu odolaly vlnovce bez přídavku zinku.
- Vlnovce s přídavkem zinku korodovaly mezikrystalově, místy skrz celou tloušťku materiálu.
- Korozní působení testovacího kondenzátu se zdá mírnější ve srovnání s působením kondenzátů v předchozích testech, což ale může být zapříčiněno i jinou metodikou testování.

Studie popsané v kap.2.4 dospěly k podobným závěrům. A sice, že značnému koroznímu napadení výše zmíněných kondenzátů při nízkém pH a s vysokým obsah chloridů, mohou odolat dle jejich zkoušení jen tzv. „multiclad“ – vícevrstvé materiály, viz Obr. 6.5.6. S tím rozdílem, že jejich výsledky neberou v potaz působení kyseliny sírové na korozi hliníkových slitin.



Obr. 6.5.6 Koroze vícevrstvého materiálu.

7 SOUHRN VÝSLEDKŮ TESTOVACÍCH PROCEDUR

V **dynamickém testu I** byly ověřovány 3 kusy chladičů stlačeného vzduchu, vyrobené z běžných slitin používaných pro stavbu tepelných výměníků, přičemž dva ze vzorků byly povlakovány. Jedním povlakem byl epoxyfenolový povlak (EPE) a druhým polymerní povlak na siloxanové bázi (SPPC).

Výsledky dynamického testu I lze shrnout následovně:

- Vzorek bez povlaku byl napaden mezikrystalovou korozí přesahující 30% tloušťky stěny trubek a u vlnovců v některých místech s průnikem skrz celou tloušťku.
- Povlakované materiály odolaly koroznímu napadení, aniž by došlo k porušení exponovaného povrchu trubek.
- Vlnovce i pájené spoje byly napadeny korozí, ale k separaci vlnovců nedošlo, to znamená, že funkce mezichladiče stlačeného vzduchu zůstává zachována, i když může být vlivem koroze vlnovců snížena.

Povlakované materiály lze tedy doporučit k výrobě chladičů plnicího vzduchu v aplikaci nízkotlakého systému recirkulace spalín.

V **dynamickém testu II** byly opět testovány celé chladiče plnicího vzduchu, k jejichž výrobě byly použity tzv. long life materiály společnosti Alcoa 0333 a Sapa 7857 Trillium pro trubky a materiál vlnovce standardní EN AW-3003. Vyhodnocení testu je uvedeno v následujících bodech:

- U obou druhů long life materiálu bylo zjištěno lokální mezikrystalové napadení zasahující do hloubky 50% tloušťky stěny trubky
- Vlnovce byly mezikrystalovou korozí degradovány rovněž jen lokálně, ovšem zpravidla přes celou tloušťku materiálu (0,07 mm)

Testované materiály tedy nevyhověly a nelze je doporučit pro výrobu chladičů plnicího vzduchu v nízkotlaké aplikaci zpětné recirkulace spalín.

Účelem **statického testu I** byla relativně rychlá a finančně dostupnější varianta ověření povlakovaných materiálů pro následné otestování v dynamickém testu I. Vzorky pro tento test byly vyrobeny z trubek (slitiny na bázi EN AW-3017) a připájených vlnovců (EN AW-3003) s epoxyfenolovým (EPE) respektive polymerním povlakem na siloxanové bázi (SPPC).

- Povrch trubek nevykazoval žádné korozní napadení.
- Vlnovce byly místy zkorodovány až na 20% původní tloušťky.

Vzorky s povlakem byly doporučeny k výrobě tepelných výměníků pro dynamické testování.

Pro ověření materiálů ve **statickém testu II** bylo vybráno 6 slitin pro výrobu plátů (PR 3916, FA 7873 a FA 7857, Hogal 3527 a Hogal 3542 a 0333) a 2 slitiny pro výrobu vlnovců (EN AW-3003, EN AW-3003+1,5% Zn). V následujících bodech jsou shrnuty výsledky testu.

- V kondenzátu č.1 vyhověly testovacím kritériím materiály plátů:
 - PR 3916 v kombinaci s vlnovcem bez přídavku zinku,
 - FA 7873 v kombinaci s vlnovcem s přídavkem zinku,
 - Hogal 3527 v kombinaci s vlnovcem s přídavkem zinku,
 - Hogal 3542 s oběma typy vlnovců,

- 0333 v kombinaci s vlnovcem bez přídavku zinku.
- V kondenzátu č.2 vyhověly testovacím kritériím materiály plátů:
 - PR 3916 v kombinaci s vlnovcem bez přídavku zinku,
 - FA 7873 s oběma typy vlnovců,
 - Hogal 3542 v kombinaci s vlnovcem s přídavkem zinku,
 - 0333 v kombinaci s vlnovcem s přídavkem zinku.
- Kondenzát č.3 byl vyloučen z dalšího testování pro své mírné korozní účinky.
- V kondenzátu č.4 vyhověly testovacím kritériím materiály plátů:
 - Hogal 3542 v kombinaci s vlnovcem s přídavkem zinku,
 - FA 7873 v kombinaci s vlnovcem bez přídavku zinku.

Vzhledem k nejednoznačnosti výsledků nelze doporučit žádný z výše uvedených materiálů pro výrobu chladičů stlačeného vzduchu v aplikaci nízkotlakého systému.

Účelem opakování statického testu II bylo dosáhnout shody ve výsledcích. Byly vybrány 4 materiálové kombinace a z každé vyrobeny 3 vzorky (Alcan 3916 s vlnovcem bez přídavku zinku, Sapa 7873, Aleris 3527 a Aleris 3542 v kombinaci s vlnovcem s přídavkem zinku).

- V kondenzátu č.1 nevyhověl testovacím kritériím žádný materiál plátů, u všech byl zaznamenán mezikrystalový průběh koroze, stejně i u vlnovců. I když převládajícím typem napadení plátů byla důlková koroze.
- V kondenzátu č. 2 vyhověl jako jediný materiál plátu Aleris 3542, který byl napaden důlkovou korozí, ta však nepřesáhla maximální povolený úbytek materiálu 30%. Důlková koroze byla převažujícím typem napadení, i když u ostatních materiálů plátů se vyskytovala i mezikrystalová koroze. Vlnovce byly napadeny mezikrystalovou korozí.
- V kondenzátu č. 4 nevyhověl žádný z materiálu plátů, převažujícím typem napadení byla důlková koroze, ale u všech vzorků se místy objevilo i mezikrystalové napadení.

Protože žádný materiál nevyhověl všem kondenzátům, nelze tyto materiály doporučit pro výrobu chladičů stlačeného vzduchu v aplikaci nízkotlakého systému.

Ve statickém testu III byly ověřovány materiály plátů vyrobené ze slitin: Alcan 3916, Aleris 3527, Aleris 3542, Alcoa 0333 a vícevrstvé materiály „multiclad“ Sapa a Aleris. Vlnovce byly zhotoveny ze slitiny jakosti 3003, případně s přídavkem zinku. Vyhodnocení je uvedeno v následujících bodech:

- Požadavkům testu jednoznačně vyhověly materiály plátů multiclad Sapa i Aleris.
- Ostatní materiály plátů byly napadeny mezikrystalovým typem koroze, ovšem zasahujícím pouze do ochranné podpovrchové vrstvy.
- Vlnovce s přídavkem zinku korodovaly mezikrystalově skrz celou tloušťku vlnovce.
- Vlnovce bez přídavku zinku vykazovaly jemné důlky na povrchu nepřesahující polovinu tloušťky materiálu.
- Metoda statického testu III byla vybrána jako vhodná pro sériové ověřování materiálů používaných pro výrobu chladičů stlačeného vzduchu v aplikaci nízkotlakého systému.

Doporučením pro další ověření je použití multiclád materiálů pro pláty v kombinaci s vlnovcem jakosti 3003 bez přídavku zinku. Rovněž stojí za úvahu, zda nepozměnit parametry vyhodnocení ve smyslu povolení mezikrystalové koroze do určité hloubky tzv. brown band vrstvy. I když je mezikrystalová koroze nepřipustná pro svůj nepředvídatelný průběh (rychlost), po naleptání vzorků bylo zřejmé, že všechny vzorky sice korodovaly mezikrystalově, ale právě pouze do oblasti ochranné vrstvy tzv. brown band.

Co se týče působení jednotlivých testovacích kondenzátů, nelze jednoznačně určit, který z nich je nejagresivnější ve svém působení na všechny materiály, protože podle výsledků působily kondenzáty na různé materiály různě. Nicméně je možné označit kondenzáty č.2 a 4 jako agresivnější než kondenzát č.3 a to jak vlivem obsahu kyseliny chlorovodíkové, tak i sírové. Není ani vhodné porovnat kondenzát použitý ve statickém testu III s kondenzáty z předchozích testování kvůli jiným testovacím podmínkám. Lze však na základě provedení všech testů zhodnotit, že materiály s povrchovou úpravou – povlakem – jsou schopny odolat kondenzátům bez napadení povrchu. Rovněž materiál multiclád vykazoval vysokou odolnost vůči působení kondenzátu. Proto je možné materiály s testovanými povlaky a materiály multiclád doporučit pro výrobu chladičů stlačeného vzduchu pro aplikaci nízkotlakého systému recirkulace spalin.

Obě předchozí statické metody testování nebraly ohled na vliv okysličení během testu, což je jeden z dalších bodů uvažovaných pro pozměnění specifikace.

Z plynů rozpouštěných ve vodě má největší vliv právě kyslík, což je dáno tím, že koroze ve vodách je většinou řízena rychlostí kyslíkové depolarizace. Důležitá je i rovnoměrnost přístupu kyslíku k povrchu - není-li přístup rovnoměrný, vznikají články s rozdílným provzdušněním a následkem je lokální napadení, které má vliv na urychlení korozních reakcí. Kyslík rozpouštěný ve vodě má menší vliv na korozi hliníku než na korozi oceli. Kyslík podporuje korozi depolarizací katody, ale v případě hliníku podporuje tvorbu ochranné oxidické vrstvy [55]. Avšak odolnost hliníku není přímo vztažena k množství kyslíku rozpouštěného ve vodě, navíc se tato odolnost příliš neliší, ať už jde o provzdušněnou nebo odvodněnou vodu. Přítomnost kyslíku vede většinou spíše k lokalizované korozi, ovšem nemá vliv na hloubku důlků [28].

Kyslík není jen stimulátorem koroze, ale podporuje i tvorbu ochranných vrstev, a je-li jeho obsah ve vodě dostatečný, může korozi omezovat. Oxidační složkou je vůči hliníku již samotná kyselina sírová přítomná v testovacích kondenzátech a další rovnoměrný a dostatečný přístup kyslíku by měl podporovat udržení pasivního stavu hliníkové slitiny. To však platí pro volný povrch, s rovnoměrným přístupem všech oxidačních složek. Rozhodující však může být druh a množství dalších složek přítomných v roztoku, jako jsou chloridy a jiné aktivátory koroze, charakter vznikajících reakčních produktů (možnost vzniku úsad) a vliv případných konstrukčních štěrbin. V tomto případě by zvýšený přístup kyslíku k volnému povrchu materiálu měl podporovat lokální korozní napadení materiálu mimo volný povrch, tedy přechod do aktivního stavu ve štěrbinách nebo pod úsadami, kde v důsledku nerovnoměrného přístupu kyslíku mohou vznikat koncentrační články [63]. Ověření vlivu okysličení během testu je nad rámec této disertační práce, bude provedeno v dalších testech.

8 ZÁVĚR

Kondenzace kyselin způsobujících agresivní korozní prostředí v chladiči plnicího vzduchu výrazně zkracuje jeho životnost, což je hlavním problémem nízkotlakého systému EGR. V současné době řešení tohoto problému spočívá v použití vysokotlakého i nízkotlakého EGR okruhu s možností úpravy průtoku spalin oběma okruhy. Dosažení maximálního průtoku nízkotlakým systémem je pak hlavním systémovým úkolem. Pro jeho zdárné vyřešení je však nutné nalézt dostatečně odolné komponenty, respektive materiály pro tyto komponenty, použité v nízkotlakém systému EGR, které budou schopny vydržet extrémní korozní podmínky. Tímto komponentem je i chladič plnicího vzduchu. Do této doby byla předmětem studia a testů primárně externí koroze, tato práce má za cíl poskytnout širší náhled na oblast koroze „interní“, tedy korozi vnitřního povrchu tepelného výměníku. Výzkum korozního působení na vnitřní povrch chladiče plnicího vzduchu byl předmětem této disertační práce.

V prvotní fázi práce byl proveden rozbor dané problematiky, zjištění chemického složení kondenzovaných kyselin tzv. modelových kondenzátů, výběr modelových kondenzátů a definování úvodního přístupu k testování stanovením statického testu. Na základě výsledků statického testu byly vybrány vzorky pro náročnější dynamický test I. s povlakovanými materiály, jež byly vybrány pro jejich maximální ochranu vůči korozi. Povlakované materiály v testu jednoznačně uspěly, ale vzhledem k jejich vysoké ceně a technologické náročnosti výroby není zatím možné jejich rozšíření v praxi.

Proto se další testování soustředilo na jinou, cenově dostupnější, variantu materiálů odolných vůči korozi. Standardně se jako nejodolnější materiály vůči korozi používají long life slitiny. Jde o materiály se zvýšenou korozní odolností oproti běžné slitině jakosti 3003. Korozní odolnost těchto slitin zajišťuje precipitace malých částic $\alpha\text{-Al(MnFe)Si}$ v difúzní vrstvě podél rozhraní mezi základním materiálem a plátováním. Zmíněné částice jsou vůči základnímu materiálu anodické, proto korodují přednostně. Koroze tedy probíhá podélně vrstvou precipitátů tzv. brown band. Ovšem tyto materiály v dynamickém testu II nevyhověly, neboť charakter korozního napadení byl mezikrystalový, což je nežádoucí pro jeho nepředvídatelný průběh. Praktické použití takového materiálu je tedy diskutabilní.

V době provádění testů však nebyly dostupné jiné korozi odolnější materiály než long life slitiny, bylo tedy nezbytné přistoupit k podrobnějšímu testování, které spočívalo jednak v širším výběru long life slitin a jednak v ověření korozního účinku kondenzátů o různém složení a rozdílné hodnotě pH. To bylo provedeno v rámci statického testu II, který je oproti dynamickému testu finančně dostupnější a umožňuje otestovat větší množství vzorků najednou, přičemž při vyhodnocování bylo zjištěno, že výsledky jsou vypovídající a srovnatelné s dynamickým testem II.

Pro statický test II byly vybrány vzorky vyrobené ze šesti různých long life slitiny a dvou materiálů jakosti 3003 (jeden s přídatkem 1,5% zinku). Přičemž dva z materiálů plátů již byly ověřovány v předchozím testu. Jejich opětovné testování bylo zvoleno z důvodu porovnání agresivity kondenzátů různého chemického složení, definovaného na základě experimentálních dat, a získání informací o charakteru korozního napadení.

Celkem bylo v rámci statického testu II hodnoceno 48 materiálových kombinací a 4 různé kondenzáty. Cílem testu bylo krom nalezení vhodné materiálové kombinace také nalezení

modelového kondenzátu s nejvyšším korozním účinkem. Na základě prvotních výsledků byl vyloučen kondenzát č.3 pro své mírné korozní účinky. Působení ostatních modelových kondenzátů na zkoušené materiály se projevovalo různě a nebylo možno jednoznačně určit, který kondenzát je nejagresivnější. Vyšší míra agresivity byla zjištěna u kondenzátů č.2 a 4. S výjimkou slitiny 3542 se u všech materiálů vyskytoval mezikrystalový průběh koroze alespoň v jednom z kondenzátů. Negativní vliv na korozi materiálu měl jednoznačně obsah chloridů v roztoku a obsah kyseliny sírové.

Ve statickém testu II nebyl tedy zjištěn nejagresivnější modelový kondenzát, tzn., že v budoucnu je možno použít pro testování kterýkoli ze tří srovnatelných kondenzátů pro omezení složitosti testů. Vyhodnocením statického testu II nevyplynula žádná vhodná materiálová kombinace. Vzhledem ke statisticky malému počtu vzorků reprezentujících jednu materiálovou kombinaci a pro nejednoznačnost výsledků proběhlo další testování čtyř vybraných kombinací s větším počtem vzorků jednoho druhu, aby bylo dosaženo statisticky vypovídajících dat. I v tomto opakovaném statickém testu II vykazovaly všechny vzorky napadení mezikrystalovou korozi v různé hloubce v plátech i vlnovcích. Nebylo tedy možné doporučit materiály vhodné pro výrobu chladičů stlačeného vzduchu v nízkotlakém systému recirkulace spalin.

Během provádění statického testu II byly na trh uvedeny nové vícevrstvé materiály tzv. multiclاد, které se vyznačují vyšší odolností proti korozi oproti běžným i long life slitinám díky mezivrstvě materiálu, která je naválcovaná mezi jádro a pájecí materiál. Byl proveden nový statický test III s pozměněnou metodikou a upraveným modelovým kondenzátem. Spolu s multiclاد materiály pro pláty byly opětovně testovány již ověřované long life slitiny, pro porovnání vlivu změny metodiky testu a účinku upraveného kondenzátu. Výsledkem testu bylo mírné případně žádné působení na povrch multiclاد materiálů a opětovné mezikrystalové napadení ochranné vrstvy tzv. brown band u long life slitin. Z tohoto pohledu lze multiclاد materiál doporučit pro danou aplikaci. Dále zůstává otevřená otázka na pozměnění specifikace týkající se hodnocení mezikrystalové koroze u long life slitin z hlediska povolení tohoto typu korozního napadení, avšak pouze do určité hloubky, kde dochází k formování ochranné vrstvy.

Vyhodnocením statického testu III bylo tedy stanoveno, že nejen z hlediska korozní odolnosti, ale i po finanční stránce, jsou vyhovujícími materiály pro stavbu chladičů stlačeného vzduchu v aplikaci nízkotlakého systému EGR vícevrstvé materiály tzv. multiclاد. Srovnáním výsledků a ceny všech provedených testů byl pro sériové testování schválen statický test III. Hlavním přínosem tohoto testu je možnost ověření většího počtu vzorků v porovnání s dynamickým testem, přičemž výsledky jsou srovnatelné. Ověření materiálu v dynamickém testu navíc klade větší nároky na testovací zařízení. Dynamické testy budou dále používány pouze jako zkušebními metody pro ověřování vývojových studií.

Při verifikaci výsledků konkurenčního testování „interní koroze“ v agresivním prostředí simulujícím výfukové spaliny bylo zjištěno, že testování materiálů použitých pro aplikaci v nízkotlakém systému recirkulace spalin provádějí i další společnosti automobilového průmyslu s podobnými výsledky, a sice že vyhovujícími materiály pro výrobu chladičů stlačeného vzduchu v aplikaci nízkotlakého systému EGR jsou vícevrstvé materiály případně long life slitiny s určitým omezením.

8.1 PŘÍNOS PRÁCE

Přínos dizertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- Provedení úvodního výzkumu v oblasti nové problematiky „interní“ koroze chladičů stlačeného vzduchu v aplikaci nízkotlaké recirkulace spalin.
- Nalezení modelových kondenzátů definovaných na základě experimentálních dat a vyhodnocení korozního účinku na standardní materiály používané při výrobě chladičů stlačeného vzduchu v systému nízkotlaké recirkulace spalin a dále také na materiály v této aplikaci dosud nepoužité.
- Nalezení vhodné experimentální procedury pro ověření korozního působení modelových kondenzátů na materiály používané pro výrobu chladičů stlačeného vzduchu v aplikaci nízkotlaké recirkulace spalin včetně definování testovacích procedur pro využití při testování v praxi.
- Nalezení materiálů použitelných pro výrobu chladičů stlačeného vzduchu v aplikaci nízkotlaké recirkulace spalin.

9 POUŽITÉ ZDROJE

- [1] SALONITIS, Konstantinos a kol. *Multifunctional Materials Used in Automotive Industry: A Critical Review*. In: *Engineering against fracture, Proceedings of the 1st Conference*. Munich: Springer Science+Business Media BV, 2009, s.59-70. ISBN 978-1-4020-9401-9
- [2] HIERETH, Hermann, PRENNINGER, Peter H.W. *Charging the Internal Combustion Engine*. Wien: Springer-Verlag, 2007. ISBN 978-3-211-33033-3
- [3] *Magazine Turbo. A century of turbocharging*. Baden: ABB Turbosystems Ltd., 2005. 2.
- [4] HARTMANN, Jeff. *Supercharging Performance Handbook*. Minneapolis, 2011. ISBN-13: 978-0-7603-3938-1
- [5] PRÁŠEK, O. *Návrh a posouzení alternativ přepřínování vznětového motoru s recirkulací* [online]. VUT v Brně, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, ©2008. Poslední změna 15.11.2012 [cit. 2010-11-03]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10716
- [6] GILLES, Tim. *Automotive service: inspection, mainenance, repair*. Ney York: Delmar Learning, 2004. ISBN-13: 978-1-1111-2861-6.
- [7] COMMISSION REGULATION (EC) No 706/2007 - laying down, pursuant to Directive 2006/96/EC of the European Parliament and of the Council, administrative provisions for the EC on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, 2007.
- [8] BENNETT, Sean. *Modern diesel technology: Diesel Engines*. Delmar: Cengage Learning, 2009. ISBN-13: 978-1-4354-4044-9.
- [9] ERJAVEC, Jack. *Automotive Technology: A Systems Approach*. New York: Thompson Delmar Learning, 2005. ISBN: 1-4018-4831-1.
- [10] VAN BASSHUYSEN, Richard; SCHAEFER, Fred. *Internal combustion engine*. Warrendale: SAE International, 2004. ISBN 978-076801139-6.
- [11] SHAH, K.,Ramesh, SEKULIĆ, Dušan, P. *Fundamentals of heat exchanger design*. Hoboken: John Willey&sons, 2003. ISBN 0-471-32171-0.
- [12] MERKER, Gunter, SCHWARZ, Christian, TEICHMANN Rudiger. *Combustion engines development*. Berlin: Springer-Verlag, 2012. ISBN: 978-3-642-02951-6.
- [13] RAUSCHER, Jaroslav. *Spalovací motory*. Brno : Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické. Kapitola Přímé chlazení, s. 213-215.
- [14] RUŽA, Viliam. *Pájení*. Praha: SNTL, 1988. 04-216-88.
- [15] JACOBSON, M. David, HUMPSTON, Giles. *Principles of Brazing*. Materials Park: ASM International, 2005. ISBN-13: 978-0-87170-812-0.
- [16] http://www.solvay-fluor.com/library/search/results/0,0,-_EN,00.html © 1996-2001, Solvay S.A.
- [17] HALSTEAD, Gary. A. et.al. *Method and apparatus for convection brazing of aluminum heat exchangers*. USA. US005147083A. 15.9.1992.

- [18] MUNDT, R. *Introduction to Brazing of Aluminium Alloys*. Koblenz: European Aluminium Association, Tallat Lecture 4601, 1994.
- [19] ALCOA. *Brazing Alcoa Aluminum*. Pittsburgh: Aluminum Company of America, 1967. G07-10416.
- [20] MILLER, W. S. a spol. *Recent development in aluminium alloys for the automotive industry*, Hoogovens Research & Development, Materials Science and Engineering: A, 280(1): 37-49, 2000.
- [21] Controlled Atmosphere Aluminum Brazing System, Aluminum brazing [online]. ©2007, poslední revize 5.11.2010 [cit. 2010-11-05]. Dostupné z: <http://www.secowarwick.com/alumbraze/bulletins/bz134.2.pdf>
- [22] Controlled Atmosphere Aluminum Brazing-Convection preheat/radiation braze furnace, [online]. ©1995-2010, poslední revize 5.11.2010 [cit. 2010-11-05]. Dostupné z: <http://www.secowarwick.com/alumbraze/bulletins/convecrad/convectionradiation.htm>
- [23] SCHWARTZ, M. Mel. *Brazing*. Materials Park: ASM International, 2003. ISBN 0-87170-784-5
- [24] ČSN EN 485-2. *Hliník a slitiny hliníku – Plechy, pásy a desky – Část 2: Mechanické vlastnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [25] MICHNA, Štefan, LUKÁČ, Ivan, OČENÁŠEK, Vladivoj a kol. *Encyklopedie hliníku*, Prešov: Adin s.r.o., 2005. ISBN 80-89041-88-4
- [26] ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [27] TOTTEN, E. Georg, MacKENZIE, D. Scott. *Handbook of Aluminum, Volume 1 Physical Metallurgy and Processes*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. ISBN: 0-8247-0494-0
- [28] VARGEL, Christian. *Corrosion of Aluminium*. Kidlington: Elsevier, 2004. ISBN: 0-08-044495-4.
- [29] DAVIS, R. Joseph. *Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys*. 2nd edition. Materials Park: ASM International, 1999. ISBN: 0-87170-629-6.
- [30] TOTTEN, E. Georg, MacKENZIE, D. Scott. *Handbook of Aluminum, Volume 2 Alloy Production and Materials Manufacturing*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. ISBN: 0-8247-0896-2.
- [31] GHALI, Edward. *Corrosion Resistance of Aluminum and magnesium Alloys*. Hoboken: John Wiley&sons, 2010. ISBN: 978-0-471-71576-4.
- [32] HATCH J.E. *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. 8th edition. Materials Park: ASM International, 1984. ISBN: 0871701766
- [33] ČSN EN ISO 8044. *Koroze kovů a slitin – Základní termíny a definice*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [34] ČSN ISO 11846. *Koroze kovů a slitin - Stanovení odolnosti proti mezikrystalové korozi u slitin hliníku vytvrzovaných za tepla*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [35] ČSN 038137. *Kovy, slitiny a kovové povlaky. Metalografické vyhodnocování korozního napadení*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

- [36] ASTM G85-11 *Standard Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing. Annex A3, seawater acidified test, cyclic (SWAAT)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/G0085-11.
- [37] ASTM B117-11 *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/B0117-11
- [38] ČSN ISO 9227. *Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou*. Praha: Český opalizační institut, 2007.
- [39] TWI limited. *Guidelines for use of statistics for analysis of sample inspection of corrosion*, Norwich: HSE Books, 2002. ISBN: 0-7176-2554-0.
- [40] WACKERLY, D.Dennis, MENDENHALL William, SCHAEFFER L.Richard. *Mathematical Statistics with Applications*. 7th reedition. Belmont: Cengage Learning, 2008. ISBN-10: 0-0495-11081-7.
- [41] COFFIN Marie, COPELAND A.F.Karen. *Introductory Statistics for Enginnering Experimentation*. San Diego: Elsevier Science, 2003. ISBN: 0-12-515423-2.
- [42] ERIKSSON, Lennart etc. *Design of experiment: principles and applications*. 3rd edition. Umea: Umetrics, 2008. ISBN-10: 91-973730-4-4.
- [43] GANESAN, V. *Internal combustion engine*. 2nd edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008. ISBN 10: 0-07-064817-4.
- [44] RAYMOND, J. Kilmer. Recovered high strength multilayer aluminum brazing sheet products. USA. Patentové číslo US7374827. 20.5.2008.
- [45] VDA 230-214. *Resistance of metallic materials to condensate corrosion in exhaust gas-carrying components - Testing methods*. Bietigheim-Bissingen: DKF, 2010.
- [46] MARTYR, A.J., PLINT, M.A. *Engine testing*, 3rd edition. New York: Elsevier, 2007. ISBN-13: 978-0-7506-8439-2.
- [47] MELANDER, M., WOODS, R. *Corrosion study of brazed aluminum radiators retriever from cars after field service*, *Corrosion*, 2010, roč. 66, č.1
- [48] OGIVARA, Y., OKADA, K. *Sacrificial Corrosion Protection Ability of Aluminum Alloys for Automobile Heat Exchangers*. Furukawa review, 1999, č.18
- [49] Corrosion behavior of hydro longlife alloys [online]. ©2010, poslední revize 5.11.2010 [cit. 2010-11-05]. Dostupné z: <http://www.hydro.com/en/Our-business/Aluminium/Products/Automotive-and-transport/Automotive-products/Heat-exchanger/Strip-and-sheet/rosion-behaviour-of-Hydro-long-life-alloys/>
- [50] Corus Aluminium Walzprodukte [online]. ©2001, poslední revize 5.11.2010 [cit. 2010-11-05]. Dostupné z: <http://www.allbusiness.com/primary-metal-manufacturing/alumina-aluminum/839653-1.html>
- [51] SZALA, E., WAINER, M., VIEREGGE, K. *A closer look at the internal corrosion test for automotive heat exchangers*. *Surface and Interface Analysis*, 2010, roč. 42, č.9
- [52] ZALDIVAR, J.Garcia. Exhaust gas condensates corrosion test on low pressure cooling systém of aluminum brazed EGR, WCAC and ACAC. In: *Aluminium Brazing: the 7th International*


- Brazing Congress: May 22-24, 2012, Düsseldorf, Germany.* Hamm: Griebisch&Rochol Druck GmbH&Co.KG, 2012,s.65-75. ISBN: 978-3-87155-596-1.
- [53] JANSSEN, Hartmut, SASS, V., SICKING, R., MROTZEK, M. Hydro aluminium – new multilayer materials. In: *Aluminium Brazing: the 7th International Brazing Congress: May 22-24, 2012, Düsseldorf, Germany.* Hamm: Griebisch&Rochol Druck GmbH&Co.KG, 2012,s.35-45. ISBN: 978-3-87155-596-1.
 - [54] RICE, A. John. *Mathematical Statistics And Data Analysis*, 3rd edition. Delmar: Cengage Learning, 2003. ISBN: 0534399428.
 - [55] HACKERMAN, Norman. *Effect of temperature on corrosion of metal by water*. Industrial and Engineering Chemistry, vol.44, 1952, s.(1752-1755)
 - [56] ASTM G46-94 Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, DOI: 10.1520/G0046-94R05
 - [57] ČSN ISO 11463. *Koroze kovů a slitin - Hodnocení bodové koroze*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
 - [58] ČSN ISO 11845. *Koroze kovů a slitin – Všeobecné zásady pro korozní zkoušky*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
 - [59] ČSN ISO 8993. *Anodická oxidace hliníku a jeho slitin – Systém hodnocení bodové koroze – Grafická metoda*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
 - [60] ČSN ISO 8994 *Anodická oxidace hliníku a jeho slitin – Systém hodnocení bodové koroze – Mřížková metoda*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
 - [61] ČSN ISO 8407. *Koroze kovů a slitin – Odstraňování korozních zplodin ze vzorků podrobených korozním zkouškám*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
 - [62] FREEDMAN, David, PISANI, Robert, PURVES, Roger. *Statistics*. 4rd edition. New York: W W Norton & Company Incorporated, 2007. ISBN: 0393929728
 - [63] NOVÁK, Pavel. *Korozní inženýrství* [online]. VŠCHT, 2002 [cit.8.5.2013]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/s_iproje.htm

10 SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ

- [V1] DROZDOVÁ, Zita, KIJONKA, Petr: Hutnické listy č.3/2012, roč.LXV, ISSN:0018-8069, str.8-13, celkem 86 stran
- [V2] DROZDOVÁ, Zita: Mezinárodní konference metalurgie a materiálů 2011, sborník příspěvků z mezinárodní konference. Metal 2011, Brno 18.-20.5.2011. Ostrava: Tanger s.r.o.2011. ISBN: 978-80-87294-24-6
- [V3] DROZDOVÁ, Zita: Mezinárodní konference metalurgie a materiálů 2013, Metal 2013, Brno 15.-17.5.2011. Ostrava: Tanger s.r.o.2013. ISBN: 978-80-87294-41-3

11 SEZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ VELIČIN

Poznámka: označení, u něhož není uveden rozměr, reprezentuje obecnou proměnnou. Některá označení jsou užitá v původním znění dle zvyklostí u daného problému a také v případech málo výstižných českých ekvivalentů cizích označení.

T_m	teplota tavení [$^{\circ}\text{C}$]
ρ	hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
α	délková roztažnost [K^{-1}]
c	měrná tepelná kapacita (specifické teplo) [$\text{J}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}$]
E	Youngův (elastický) modul [MPa]
λ	tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
ρ	elektrický odpor [$10^{-3} \mu\Omega\text{m}$]
m	hmotnost [kg]
A	atomová hmotnost [-]
t	čas [s]
E	elektrochemický potenciál kovu [eV]
pH	potenciál vodíku (vodíkový exponent) [-]
N	rozdělení
μ	střední hodnota
	výběrový průměr
S^2	výběrový rozptyl
F	testovací kritérium
H_0	nulová hypotéza
n	rozsah souboru (počet členů)
p	hladina významnosti

Zkratky

EGR	recirkulace výfukových plynů (Exhaust Gas Recirculation)
CAC	chladič plnicího vzduchu (Charge Air Cooler)
CAB	pájení v ochranné atmosféře (Controlled Atmosphere Brazing)
ASTM	americká společnost pro testování a materiály (American Society for Testing and Materials)
EN AW-xxxx	evropská norma tvářený hliník-xxxx (european norm aluminium wrought –xxxx)
SWAAT	test v okyselené syntetické mořské vodě (Sea Water Acetic Acid Test)
LLA	slitiny s dlouhou životností (Long Life Alloys)
BMW	Bayerische Motorwerke
VW	Volkswagen

Označení zde neuvedených veličin vyplývá ze schémat a popisů vyskytujících se přímo v textu.

